

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

479

SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS

(Physique classique)

PAR

Augustin SESMAT

Professeur d'Histoire et de Critique des Sciences
à l'Institut Catholique de Paris

CURRENT SCIENCE
RECEIVED.

11-7-37

I

LE PROBLÈME DES MOUVEMENTS RÉELS



PARIS

HERMANN & C^{ie}, ÉDITEURS

6, Rue de la Sorbonne, 6

1937



ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



René AUDUBERT
Directeur de Laboratoire à l'Ecole
des Hautes Etudes
ÉLECTROCHIMIE THÉORIQUE

J.-P. BECQUEREL
Professeur au Museum d'Histoire Naturelle
**OPTIQUE ET MAGNÉTISME
AUX TRÈS BASSES TEMPÉRATURES**

G. BERTRAND
Membre de l'Institut
Professeur à l'Institut Pasteur
CHIMIE BIOLOGIQUE

L. BLARINGHEM
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
BIOLOGIE VÉGÉTALE

Georges BOHN
Professeur à la Faculté des Sciences
ZOOLOGIE EXPÉRIMENTALE

J. BORDET
Prix Nobel
Directeur de l'Institut Pasteur de Bruxelles
MICROBIOLOGIE

J. BOSLER
Directeur de l'Observatoire de Marseille
ASTROPHYSIQUE

Léon BRILLOUIN
Professeur au Collège de France
THÉORIE DES QUANTA

Louis de BROGLIE
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
Prix Nobel de Physique
**I. PHYSIQUE THÉORIQUE
II. PHILOSOPHIE DES SCIENCES**

Maurice de BROGLIE
De l'Académie Française
et de l'Académie des Sciences
**PHYSIQUE ATOMIQUE
EXPÉRIMENTALE**

D. CABRERA
Directeur de l'Institut de Physique et Chimie
de Madrid
**EXPOSÉS SUR LA THÉORIE
DE LA MATIÈRE**

E. CARTAN
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
GÉOMÉTRIE

M. CAULLERY
Membre de l'Académie des Sciences
Professeur à la Faculté des Sciences
BIOLOGIE GÉNÉRALE

L. CAYEUX
Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France
GÉOLOGIE

A. COTTON
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
MAGNÉTO-OPTIQUE

Mme Pierre CURIE
Professeur à la Sorbonne
Prix Nobel de Physique
Prix Nobel de Chimie
**RADIOACTIVITÉ
ET PHYSIQUE NUCLÉAIRE**

Véra DANTCHAKOFF
Ancien Professeur à l'Université Columbia
(New-York)
Organisateur de l'Institut
de Morphogenèse Expérimentale
(Moscou Ostankino)
**LA CELLULE GERMINALE
DANS L'ONTOGENÈSE ET L'ÉVOLUTION**

E. DARMOIS
Professeur à la Sorbonne
CHIMIE-PHYSIQUE
K. K. DARROW
Bell Telephone Laboratories
CONDUCTIBILITÉS DANS LES GAZ

Arnaud DENJOY
Professeur à la Sorbonne
**THÉORIE DES FONCTIONS
DE VARIABLE RÉELLE**

J. DUESBERG
Recteur de l'Université de Liège
**BIOLOGIE GÉNÉRALE
EN RAPPORT AVEC LA CYTOLOGIE**

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE

B. S. Mahapatra

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

479

SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS

(Physique classique)

PAR

Augustin SESMAT

Professeur d'Histoire et de Critique des Sciences
à l'Institut Catholique de Paris

I

LE PROBLÈME DES MOUVEMENTS RÉELS



PARIS

HERMANN & C^{ie}, ÉDITEURS

6, Rue de la Sorbonne, 6

—
1937

DU MÊME AUTEUR :

(LIBRAIRIE HERMANN)

I. — SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS

(*Physique classique*)

- I. — Le problème des mouvements réels.
- II. — L'Ancienne astronomie, d'Eudoxe à Descartes.
- III. — Mécanique newtonienne et gravitation.
- IV. — Le système absolu de la mécanique.
- V. — L'optique des corps au repos.
- VI. — L'optique des corps en mouvement.
- VII. — L'esprit de la science classique.

II. — SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS

(*Physique relativiste*)

- I. — Genèse des théories de la relativité.
- II. — Principes de la théorie restreinte.
- III. — Les systèmes privilégiés de la théorie restreinte.
- IV. — Principes de la théorie générale.
- V. — Théorie relativiste de la gravitation.
- VI. — Les systèmes privilégiés de la théorie générale.
- VII. — Essai critique sur la doctrine relativiste.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

COPYRIGHT 1937 BY LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie},
PARIS.



AVANT-PROPOS

Tout le monde sait, du point de vue de l'expérience courante, distinguer un mouvement *réel* — celui d'une voiture en marche par rapport à la route —, d'un mouvement simplement *apparent* — celui des arbres de la berge par rapport au passager de la voiture qui les voit fuir en arrière à mesure que la voiture avance.

On sait distinguer aussi un mouvement *simple*, qui s'accomplit immédiatement par rapport au repère regardé comme fixe — mouvement d'un homme qui marche sur le sol —, d'un mouvement *complexe*, qui résulte d'un mouvement *propre* du mobile par rapport à un ensemble de corps et de son mouvement d'*entraînement* avec ces corps relativement au repère fixe — mouvement d'un voyageur qui circule dans le couloir d'un train en marche et qui en même temps est entraîné avec le train relativement à la voie.

D'instinct, les hommes rapportent, immédiatement ou non, au globe terrestre tous les mouvements qu'ils observent, même ceux des astres. Mais, la Terre est-elle fixe ? Ne sont-ils pas emportés par elle dans quelque mouvement réel qui leur ferait attribuer aux astres des mouvements qu'ils n'éprouvent pas, comme sont ceux des arbres de la route pour l'automobiliste ?

Comment donc *discerner* les mouvements réels des mouvements apparents qui n'en sont que la contre-partie ? Nous savons que la voiture avance réellement parce qu'elle est mue par un moteur, et le piéton aussi, parce que ses muscles travaillent à le mouvoir, tandis que les arbres ne sont mûs par rien. Mais y a-t-il un critère universel qui permette de discerner toujours les mouvements

réels des mouvements corrélatifs qui ne sont qu'apparents et cela même dans le cas des astres ?

Et d'autre part, y a-t-il quelque *repère fixe universel*, quelque système de référence *absolu*, auquel tous les mouvements réels du monde puissent se rapporter, directement ou non, comme dans l'expérience courante on les rapporte tous, en définitive, à la Terre, regardée comme fixe ?

Tels sont les deux problèmes, étroitement liés, que nous nous sommes proposé de résoudre. Après avoir précisé comment se pose la question, montré qu'elle relève solidairement de la Mécanique, de l'Optique et de l'Astronomie, et rapidement passé en revue les réponses qu'essayèrent d'y apporter les Anciens, nous rappelons le principe de solution fourni par la mécanique et l'astronomie newtoniennes — et que confirmera l'Optique de Fresnel et même celle de Lorentz — ; puis dépassant le point de vue de la science positive nous tirons de ce principe toutes les conséquences qu'il entraîne relativement au système absolu et à la détermination complète des mouvements réels ; *thèse absolutiste*, donc, qui s'oppose, au moins en fait, à la conception purement relativiste du mouvement. Afin de mieux marquer la solidité de cette thèse, nous la rattachons pour finir à la Philosophie qui se trouve impliquée dans la Physique classique.

Voici en conséquence le plan de notre étude :

Chapitre 1^{er}. — *Le Problème*. — Passage de l'interprétation courante à l'interprétation scientifique des mouvements observables, y compris ceux des astres.

Chapitre 2. — *Evolution de l'Astronomie ancienne*. — Théories des mouvements réels, des Grecs aux Coperniciens.

Chapitre 3. — *Préparation de l'Astronomie moderne*. — De Copernic à Descartes.

Chapitre 4. — *Principes de la Mécanique de Newton*. — Exposé théorique et synthétique, limité aux idées essentielles.

Chapitre 5. — *Mécanique et gravitation universelle*. — Confrontation des théories de Newton avec les données expérimentales.

Chapitre 6. — *Le système absolu et les mouvements réels*. — Solution conceptuelle, mais complète, et conforme à

l'esprit du newtonisme, du problème de l'interprétation des mouvements concrets.

Chapitre 7. — *L'Ether absolument immobile et l'Optique des corps au repos.* — Exposé puis vérification des principes fondamentaux des théories de Fresnel, de Maxwell et de Lorentz.

Chapitre 8. — *L'Optique des corps en mouvement et le privilège de l'éther.* — Etude théorique puis expérimentale de l'influence du mouvement sur les phénomènes lumineux et électromagnétiques. Identification du système absolument privilégié de l'Optique et du système absolu de la Mécanique.

Chapitre 9. — *L'Esprit de la science classique.* — Synthèse et interprétation philosophique des postulats classiques.

La lecture d'une telle étude ne va-t-elle pas supposer que l'on connaisse d'avance les théories ? Pas nécessairement, parce que, écrivant surtout pour les non-spécialistes, nous nous sommes toujours astreint à faire un exposé aussi élémentaire que possible, mais suffisant de l'essentiel des doctrines, persuadé que si l'on peut bien écrire un traité de Physique sans y mêler aucune considération d'histoire ni de philosophie des sciences, on ne peut guère retracer exactement l'évolution des idées des physiciens ni apprécier utilement leurs méthodes et leurs théories sans ébaucher du même coup les traits essentiels d'un traité de physique.



CHAPITRE PREMIER

LE PROBLÈME

ARTICLE PREMIER

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES SUR LE MOUVEMENT ET SES CAUSES

1. Implication des idées simples dans les idées complexes, et subordination des sciences. — L'idée de mouvement, c'est-à-dire l'ensemble des termes et des relations qu'on désigne par ce substantif, ne saurait se concevoir sans deux autres « idées » qu'elle contient et que l'analyse y découvre, celle de Temps et celle d'Espace. D'autre part, l'étude des figures spatiales, non moins que la détermination précise d'un mouvement quelconque serait impossible sans le Nombre, ou plutôt sans l'application des rapports numériques à la mesure de certaines grandeurs. On peut très bien, au contraire, étudier par exemple les nombres sans recourir aux lois du mouvement, ni même à celles de l'Espace.

C'est que précisément le Mouvement est chose plus complexe que l'Espace, le Temps ou le Nombre, en ce sens qu'il implique ces notions et y ajoute ; tandis que le Nombre, lui, est plus simple que le Mouvement et même que l'Espace. Or, il semble bien que la distinction entre idées plus simples et idées plus complexes soit générale, et s'applique même aux aspects du réel, à condition qu'on considère seulement les notions ou les lois fondamentales de la pensée ou des choses. C'est ainsi que l'idée de force ne pourra se concevoir sans celle de mouvement, mais y ajoutera ; et que les phénomènes de la vie impliqueront ceux de la Physique et de la Chimie tout en les dépassant en complexité.

Si, comme il est raisonnable, on regarde les idées les plus géné-

rales qui existent en fait comme obtenues par analyse et par induction à partir du réel, on verra qu'elles forment une hiérarchie discontinue de termes distincts, de complexité décroissante — ou d'abstraction de plus en plus poussée — à partir des aspects les plus riches du concret.

Le fait que les notions fondamentales sont distinctes pour la pensée entraîne l'existence d'une science spéciale pour chacune — à moins que le contenu n'en soit trop pauvre. On a vite fait d'épuiser la notion de Temps : quelques axiomes y suffisent que l'on joint d'ordinaire à la définition de cette idée ; mais pour étudier les nombres et leurs rapports on a créé l'*Arithmétique* ; les propriétés générales et les figures de l'espace font l'objet de la *Géométrie* ; les mouvements conçus sans aucun souci de leur enchaînement causal, celui de la *Cinématique* ; les mouvements en tant que produits par des forces, celui de la *Dynamique*. De même, vers l'autre extrémité de l'échelle, la Botanique s'occupe des plantes, la Zoologie, des animaux, la Psychologie, des êtres conscients.

Ce sont bien là des sciences distinctes ; pourtant, malgré leur diversité, elles sont dans une certaine mesure solidaires. On peut dire qu'il y a dépendance, au moins de droit, et quant aux principes fondamentaux, des sciences dont l'objet est plus complexe vis-à-vis de celles dont l'objet est plus simple, et que cette dépendance n'est pas réciproque. Ainsi la Dynamique aura besoin de la Cinématique, mais non inversement ; de même la Biologie ne pourra se passer de la Physique et de la Chimie, qui pourtant se sont constituées sans elle. Il y a une hiérarchie des sciences, parallèle à celle des notions et qui en est à la fois une conséquence et une preuve.

Plusieurs philosophes ont proposé des théories de l'implication de l'abstrait dans le concret. Hamelin, en particulier, a pensé que la série des notions premières pouvait, sinon s'inventer, du moins se reconstruire par application méthodique du double procédé d'antithèse et de synthèse ; et il a constitué une échelle dialectique en fonction de cette loi de liaison rationnelle. Certes, il est permis de mettre en doute la valeur de la loi d'Hamelin, et plus encore peut-être de critiquer la façon dont il l'a utilisée pour dresser sa liste des catégories. On peut penser qu'aucune des théories de l'implication proposées jusqu'ici, ni par suite aucune dialectique ou ontologie n'est pleinement satisfaisante. Mais nous

croyons que le fait même de l'implication s'impose de façon absolue, et qu'il se manifeste justement par la dépendance non-réciproque de certains concepts par rapport à d'autres, et par la subordination hiérarchique des sciences.

On voit que nous prenons nettement position dès le début sur un des points fondamentaux de la philosophie : c'est d'abord parce que, cette idée de l'implication nous ayant depuis longtemps guidé dans nos réflexions, on comprendra mieux peut-être nos façons de nous exprimer si on l'a présente à l'esprit ; c'est ensuite parce que cette même idée entraîne en ce qui concerne notre sujet précis certaines conséquences qui peuvent y projeter quelque lumière.

2. Sciences constructives et sciences du réel. Cinématique et Dynamique. — La hiérarchie et la dépendance unilatérale des sciences dont nous venons de parler ont déjà leur intérêt quand on se borne à définir les sciences par la nature intelligible de leur objet, quand on oppose, par exemple, la figure au mouvement sans se demander s'ils sont conçus ou réels. Mais on en saisit mieux la portée dès qu'on établit entre les sciences une distinction nouvelle fondée sur la réalité ou l'irréalité de ce qu'elles étudient. L'Arithmétique, par exemple, a pour objet des nombres purement conceptuels ; et quand l'esprit humain étudie ces nombres construits par lui il n'est soumis qu'à ses propres lois générales et aux exigences mêmes des concepts dont il s'occupe, n'ayant emprunté à l'expérience qu'un minimum de données pour concevoir son objet. Nous dirons que l'Arithmétique est une science *constructive*.

Au contraire la Chimie, qui cherche à identifier des espèces naturelles, à les décrire, à les classer, à découvrir leurs réactions mutuelles, est une science du réel, science qu'il faut appeler *reconstructive*, en ce sens que notre esprit quand il s'y livre cherche à reconstituer un aspect de l'ordre supposé établi dans le monde, et qu'il s'efforce de découvrir en interprétant les apports de l'expérience. Sur quoi repose la distinction des deux sortes de sciences ? Sur les différences de complexité des objets, évidemment, eu égard à notre puissance intellectuelle. La Géométrie, comme l'Arithmétique, est une science presque exclusivement constructive, ce qui s'explique par la simplicité relative de son objet et par l'emprise presque totale que peut exercer sur lui notre

esprit. Pour la raison opposée, la Chimie, la Physique, et *a fortiori* les sciences de la vie et de la conscience sont reconstructives, leur objet dépassant de beaucoup notre pénétration par sa complexité.

Quant aux sciences du mouvement, qui nous intéressent d'une façon toute spéciale, leur objet se trouve dans la hiérarchie comme à la frontière de la simplicité et de la complexité, relativement à notre intelligence ; aussi présenteront-elles à la fois les deux caractères.

De fait, la Cinématique peut se donner pour tâche ou bien de combiner, au gré de l'esprit, des mouvements purement idéaux ; ou bien de décrire et de relier de la façon la plus systématique des mouvements perçus. De même, la Dynamique pourra déduire de l'action de forces idéales des mouvements non moins idéaux ; ou au contraire, elle essayera d'expliquer des mouvements perçus par des forces réelles. Toutefois dès qu'elles veulent s'occuper de la réalité, ces sciences doivent d'abord choisir parmi leurs théorèmes ceux qui peuvent s'appliquer aux problèmes concrets, c'est-à-dire aux mouvements des corps matériels ; ensuite elles doivent tenir compte, dans l'application qu'elles font des théorèmes choisis, des conditions initiales imposées par la nature des choses, alors que dans la construction pure, elles se donnent ces conditions arbitrairement. Aussi bien, un problème concret de mouvement n'est-il plus à proprement parler un problème de cinématique ou de dynamique, mais bien de physique. Quoi qu'il en soit du nom, d'ailleurs, un tel problème ne se résoudra pas autrement que selon les principes des sciences abstraites du mouvement : si bien que la solidarité des sciences exactes imposera ses conséquences au physicien lui-même, et devra être prise en considération par celui qui voudra apprécier à leur valeur les théories de la physique. On se rendra compte plus tard, nous l'espérons, de l'opportunité de ces distinctions et de ces remarques.

3. L'Espace, le Temps et le Nombre sont des notions premières.

— S'il est impossible de concevoir le mouvement sans recourir aux idées plus simples d'Espace, de Temps et même de Nombre, nous ferons bien, avant d'aborder le problème que nous nous proposons de traiter, et pour en faciliter l'exposé et peut-être la solution, de préciser ce qu'à notre avis il convient d'entendre

par ces mots de Nombre, de Temps et d'Espace dans les divers usages qu'on en peut faire.

Commençons par décrire la genèse sinon historique du moins vraisemblable des notions dont il s'agit. Nous verrons ainsi que chacune d'elles se présente sous des aspects différents, qu'il importe grandement de ne pas confondre.

Les idées de Nombre, de Temps et d'Espace, ou plutôt dirons-nous encore, les ensembles de termes et de rapports qu'on désigne par ces mots, font partie des notions premières, c'est-à-dire de celles qu'impliquent nos expériences et nos opérations rationnelles les plus élémentaires. Or, de telles notions ne peuvent être définies d'emblée : on en est réduit pour commencer, après les avoir soi-même utilisées, à les décrire, à les faire reconnaître au moyen d'exemples de ceux qui les ont expérimentées pour leur compte. Pourtant cet usage spontané et cette description ne vont pas sans une ébauche d'analyse rationnelle, où déjà l'on procède par dissociation, pour séparer par la pensée ce qui est perçu en bloc ; par abstraction, pour tirer d'exemples multiples certains caractères communs ; par opposition, pour éclairer ces caractères en les comparant, en soulignant leurs ressemblances et leurs différences. Les résultats de cette première élaboration, œuvre anonyme de générations nombreuses, se traduisent dans le langage courant, où chaque terme et chaque rapport caractéristique reçoivent un nom, plus ou moins concret et symbolique, mais suffisamment évocateur.

Mais l'analyse ainsi amorcée est bien incomplète : elle se poursuit dès que le savant ou le philosophe, réfléchissant à la fois sur le sens des mots et sur les choses, s'efforcent de discerner dans les données dont il s'agit les caractères les plus importants, puis de rattacher les notions ainsi épurées à quelque système conceptuel, simple dans ses éléments et dans ses lois, et par là intelligible, et qui du même coup puisse éventuellement servir pour comprendre les aspects correspondants de la réalité. On reconnaît ici les dialectiques ou les ontologies, non seulement celles qui sont explicites et prétendent être complètes, mais encore celles qui ne sont qu'implicites et partielles, et dont les données se trouvent plus ou moins éparses dans les définitions ou les axiomes des diverses sciences.

Montrons comment cette élaboration conceptuelle en plusieurs

étapes a pu s'accomplir en ce qui concerne le Nombre, le Temps et l'Espace.

4. Première idée des rapports de juxtaposition, de succession et d'addition. — Notre expérience comprend deux domaines : nous, avec nos états d'âme, nos impressions, nos pensées, nos actes ; et le monde dit « extérieur », — par rapport à notre corps auquel notre vie est plus étroitement liée. Chacun de ces deux domaines se présente comme une *multiplicité ordonnée*, comme un ensemble d'éléments à la fois distincts et soumis à certaines relations qui les rapprochent tout en les opposant.

Dans le monde, nous percevons d'abord des *êtres*, ou des *choses*, avec leurs propriétés statiques : animaux, plantes, morceaux de matière brute ; puis, des *faits* ou *événements* : apparitions brusques d'objets, variations de couleur ou de lumière, cris, chocs, etc. Quant à nos perceptions vraiment intérieures, — notre corps lui-même étant plutôt assimilable à une chose —, elles ont surtout l'aspect de faits, qu'il s'agisse de nos sensations, de nos imaginations, de nos pensées ou de nos vœux.

Mais en même temps que les choses et les faits, nous percevons leur arrangement. Et celui-ci apparaît d'abord double. Les choses sont *juxtaposées*, situées les unes par rapport aux autres à des distances et dans des directions déterminées, de telle façon que beaucoup d'entre elles peuvent être perçues d'un même regard. Les faits sont arrangés autrement : si quelques-uns d'entre eux, appartenant surtout au monde extérieur, peuvent être perçus ensemble, comme l'envol et le cri d'un oiseau, la plus grande partie, et c'est plus frappant pour notre vie intérieure, ne peuvent être l'objet d'une seule et même perception : ils se *succèdent*, peuvent être rangés les uns après les autres, avec entre eux des intervalles définis.

Du reste, à une observation plus attentive le monde se révèle sous un aspect qui se raccorde aisément aux précédents mais les dépasse : il présente à notre perception doublée de notre mémoire des *changements* lents et apparemment continus qui affectent les choses soit dans leurs propriétés intrinsèques : — croissance des êtres animés, variations des qualités sensibles des corps... — soit dans leurs rapports avec les autres choses, dans leurs rapports de situation surtout : changements de forme de certains objets,

ou *déplacements* de certains corps relativement à d'autres. Mais ceci est proprement l'objet de notre étude ; nous y reviendrons à loisir.

D'un point de vue plus abstrait, et à peine moins primitif que ceux qui nous révèlent les rapports de succession et de situation, l'expérience nous présente une multiplicité pure et simple d'*objets* distincts, ou du moins séparables, qu'il s'agisse de choses ou d'événements. Or ici encore les termes sont doublés de leurs relations, et ces relations sont celles qui unissent de la façon la plus simple les éléments d'un groupe, à l'exclusion de tout arrangement spécial rappelant l'ordre temporel ou spatial. Le rapport dont il s'agit se manifeste le mieux dans le cas fondamental : c'est l'*addition* qui lie un objet à un autre pour constituer le groupe le plus simple. Des rapports analogues peuvent lier soit un objet à un groupe préexistant, soit deux groupes entre eux : on dit que les objets peuvent être *comptés* et que leurs groupes sont plus ou moins *nombreux*.

On le voit, les relations premières d'addition, de succession, de juxtaposition, de mouvement relatif, sont impliquées dans notre description de l'expérience. Et c'est nécessaire : parce qu'elles sont aussi objectives que les termes qu'elles unissent, elles s'imposent aussi impérieusement que ces termes à nos constatations ; en supprimer une seule serait mutiler le donné immédiat ; prétendre les exclure systématiquement équivaldrait à rendre impossible la description de ce donné. Et c'est bien parce que ces rapports sont indissolublement liés à leurs termes dans la perception la plus élémentaire que le langage les exprime non moins que les termes eux-mêmes : un et plusieurs, avant et après, à droite et à gauche, marcher et s'arrêter, rester le même et devenir autre... sont des mots aussi primitifs que les noms les plus communs de choses ou de propriétés stables ; il faut dire seulement que l'invention de ces mots a nécessité le travail d'analyse auquel nous avons fait allusion car, sans ce travail, les idées correspondantes n'auraient jamais pu être conçues.

5. Analyse des termes qui s'additionnent, se succèdent ou se juxtaposent : unités, instants et points. — Nous avons dit que l'analyse des notions premières, commencée par le sens commun, se poursuit par la réflexion scientifique ou philosophique. Ici, l'on se demandera d'où vient que les objets, en dépit de leur

diversité, peuvent être comptés ; et l'on reconnaîtra sans peine qu'il leur suffit, pour cela, d'être *distincts*, c'est-à-dire de pouvoir se prêter chacun à une perception séparée. De ce point de vue on verra donc dans chaque objet, par abstraction, une *unité*, un terme capable d'être additionné à d'autres, et dans les groupements partiels d'objets des *nombres*, qui eux aussi peuvent s'additionner. On cherchera aussi à discerner ce qui dans les choses juxtaposées les rend aptes à soutenir entre elles des rapports de situation, et l'on reconnaîtra que c'est le fait qu'elles ont une *étendue* bornée ; de même on rattachera au fait qu'ils ont chacun une *durée* limitée l'aptitude des événements à être datés. Unité des objets de la perception, étendue des corps, durée des événements, apparaîtront ainsi comme des caractères abstraits dont l'idée est inséparable de celle des rapports correspondants. Mais l'analyse va s'attaquer à ces éléments abstraits eux-mêmes pour peu qu'ils soient encore complexes. Les unités qui s'ajoutent sont comme telles manifestement simples ; l'étendue d'un corps au contraire n'implique-t-elle pas, pour la pensée, une multiplicité d'étendues partielles, juxtaposées tout comme les étendues de plusieurs corps se juxtaposent ? Et la durée d'un fait n'implique-t-elle pas des durées partielles, qui se succèdent comme celles d'événements divers ? On n'a donc fait que reculer le problème en considérant dans les corps leur étendue globale, dans les faits leur durée globale. Mais on se rend compte aisément que le procédé de subdivision peut s'appliquer sans arrêt : quel en sera le terme idéal ? Le mode même de découpage va l'indiquer. Les parties d'étendue sont pour la pensée séparées par des *limites* qui n'ont plus la même complexité que leurs intervalles ; un volume est séparé en deux par une surface ; une surface par une ligne ; une ligne par un point. Et le point n'est plus séparable, il rappelle sous ce rapport l'unité. Or, tous ces éléments, surfaces, lignes, points, présentent la même aptitude à être situés par rapport à d'autres que les volumes eux-mêmes ; et c'est vrai surtout des *points*, dont la simplicité privilégiée permet de déterminer de façon rigoureuse la situation relative. Nous voici donc bien, du même coup, au terme de l'analyse et en possession des éléments primordiaux que supposent les rapports de situation. Aussi facilement nous trouverons que les *instants* sont les éléments qu'exigent les rapports de succession.

6. Construction des séries numérique, temporelle et spatiale abstraites. Finitisme et continuité virtuelle. — Aussi spontanément qu'il analyse, l'esprit humain construit. Dans ces résidus abstraits de son travail, unités des groupes d'objets, instants des durées, points des étendues, il discerne d'autant plus aisément des matériaux pour des constructions possibles qu'il n'a pu les obtenir sans remarquer leur aptitude à être comptés, datés ou situés. Avec eux donc, ou plutôt avec des éléments plus abstraits encore, conçus tout exprès par lui à l'image des unités, des instants et des points extraits de la perception, il va s'essayer à construire des séries qui reflètent ou qui prolongent les arrangements de l'expérience. Ainsi la fin de l'analyse n'est-elle pour lui que le commencement de la synthèse, analyse d'un donné concret, synthèse imitant ce donné sous forme abstraite et simplifiée.

Montrons, en nous inspirant des recherches que nous regardons comme les plus pénétrantes sur ces questions, celles d'Hamelin ⁽¹⁾, où peut aboutir ce travail de synthèse. S'inspirant de l'expérience, l'esprit humain crée donc de toutes pièces des unités vraiment abstraites, c'est-à-dire des termes simplement capables d'être additionnés, et qui appellent ce mode de groupement. Il conçoit de même de purs instants, dont l'essence est de pouvoir prendre rang les uns après les autres à des intervalles déterminés, et qui réclament cet ordre de l'avant et de l'après ; des points dont la nature est simplement d'être situables les uns à côté des autres, à des distances et dans des directions définies, et qui appellent cette juxtaposition. Du même coup, et du fait qu'on les établit entre des termes simplifiés au maximum, les rapports d'addition, de succession et de situation s'éclairent. Une série d'unités identiques qui s'ajoutent une à une de façon à constituer des sommes croissantes, chacune contenant une unité de plus que la précédente, telle est dans sa régularité idéale la série numérique en construction, série dont les *nombres* représentent les divers degrés d'avancement. Une série d'instantanés distincts qui se suivent, chacun existant seul, pour la pensée, à son tour et une seule fois, voilà l'ordre *temporel* dans sa pureté intelligible, avec ses caractères essentiels : succession des termes, unicité et irréversibilité

⁽¹⁾ O. Hamelin : *Essai sur les éléments principaux de la représentation*. 1^{re} éd. Paris, 1907, chap. I et II, p. 37 à 106.

de la série. Une série de points extérieurs les uns aux autres, mais qui pour la pensée existent tous ensemble, de telle sorte qu'on puisse parcourir la série une fois construite en deux sens opposés : voilà l'ordre *spatial* primordial, à une dimension, avec ses caractères de simultanéité et de réversibilité ; caractères qui rendent possibles, d'ailleurs, des séries autres, liées à la première comme les éléments de celle-ci étaient liés entre eux ; et c'est l'ordre spatial multiple, avec les 3 dimensions que lui attribue la géométrie classique, parce que la perception les exige et s'en contente, et celles, plus ou moins nombreuses, de mondes possibles différents du nôtre.

Il n'est pas inutile de noter ici que les nombres abstraits permettent de compter les instants et les points, et que grâce à des conventions faciles qui établissent entre un intervalle unité et un intervalle quelconque, ou entre une distance unité et une distance quelconque le même rapport simple qu'entre l'unité numérique et les nombres, on peut *mesurer* les intervalles et les distances, ce qui fait profiter les constructions temporelle et spatiale de toute la richesse et de toute la précision du langage et du symbolisme arithmétique.

Toutefois, il reste un point à éclaircir ; les éléments de l'ordre spatial concret étaient étendus ; ceux de la construction, les points, ne le sont plus. Même opposition entre les faits durables de l'ordre temporel expérimental et les instants sans durée de la construction. Faut-il remédier à cette divergence en imaginant des lignes, surfaces et volumes abstraits continus, et des durées abstraites continues ? Ou bien, s'affranchissant de l'imagination, faut-il préférer une construction faite exclusivement, comme la série des nombres, d'éléments simples, et par là parfaitement claire ? C'est l'un des aspects de la question du finitisme, et de l'interprétation du continu sensible.

Nous répondrons qu'il est une façon de concevoir la continuité qui n'introduit pas d'autres termes dans la construction que les instants et les points. De ce point de vue la continuité n'est que *virtuelle* ou, si l'on préfère, potentielle : elle consiste simplement dans la possibilité indéfinie de concevoir des intermédiaires entre deux termes donnés, et fait pendant à la possibilité indéfinie de concevoir des termes nouveaux au delà des séries déjà construites. Ce que l'on conçoit de façon complète est toujours constitué d'un

nombre déterminé d'instants ou de points. Une figure véritable est un groupement de points en nombre limité avec entre eux tels rapports de distance, et telles différences de direction entre les droites qu'ils déterminent 2 à 2. C'est ainsi qu'un triangle comporte 3 points avec 3 distances dans le même plan ; un tétraèdre 4 points avec 6 distances dans des plans différents. A ce compte-là, les lignes et les surfaces ne sont pas des figures au même sens que les polygones ou les polyèdres, mais bien des lieux géométriques, c'est-à-dire de simples lois pour disposer des points, leur continuité n'étant que l'aspect imaginaire du nombre arbitraire des points qu'on peut situer conformément à ces lois. Telle est la conception *finitiste*, dont nous pourrions signaler plusieurs conséquences ou extensions importantes, mais dont il nous suffira pour le moment d'avoir rappelé le principe.

Voyons maintenant comment peut s'élaborer avec ces matériaux l'idée de mouvement sous son aspect le plus simple.

7. Mouvement d'un point sur un axe. Vitesse constante et vitesse variable. — Comme la géométrie, la cinématique et la dynamique tirent leurs données premières d'une interprétation obvie de l'expérience : c'est une perception directe qui fournira l'idée du déplacement relatif de deux corps ; une comparaison plus ou moins précise de mouvements simultanés qui mènera à l'idée de vitesse ; le sentiment de l'effort nécessaire pour mouvoir un corps qui suggèrera l'idée de force. Mais, ici encore, à peine l'esprit est-il en possession de ces données qu'il les considère sous leur aspect intelligible pour en étudier les propriétés et pour les combiner à son gré. Commençons par rappeler les résultats essentiels auxquels aboutit au sujet du mouvement ce travail constructif de l'esprit : nous ne saurions en effet sans cette étude préalable ni analyser utilement la perception des mouvements observables ni comprendre ensuite comment se pose le problème de leur réalité.

L'Espace et le Temps, éléments du mouvement, vont intervenir en cinématique abstraite sous leur forme purement conceptuelle, bien entendu, et ce sont d'abord des instants et des points, avec les rapports correspondants, qu'ils apporteront à la cinématique. Mais du point la cinématique va faire un *mobile*, c'est-à-dire un terme qui change de position d'un instant à l'autre ; et ceci

suppose qu'elle ait aussi emprunté à l'Espace des lignes, lieux géométriques sur lesquels puissent être déterminées les positions successives du point mobile, et qui lui servent de *trajectoires*. Du même coup ces positions deviendront essentiellement transitoires, chacune n'étant que traversée à son tour ; ou si l'on veut instantanées, le mobile n'occupant jamais la même à deux instants différents. Enfin, entre deux positions données, aussi rapprochées qu'on voudra, et correspondant à deux instants donnés, on pourra toujours concevoir d'autres positions qui correspondront aux instants intermédiaires suivant la même loi qui liait aux deux premiers instants les deux premières positions : nous retrouvons ainsi dans le cas du mouvement la même *continuité virtuelle* que nous avons reconnue à la série du Temps et aux lignes de l'Espace.

La trajectoire la plus simple pour le mouvement d'un point étant la droite, on réalise en cinématique la construction primordiale en se donnant un axe rectiligne et sur cet axe une origine fixe : les positions du point mobile sur l'axe se déterminent par leurs distances à l'origine. La loi du mouvement exprime ces distances en fonction du temps, c'est-à-dire en fonction des intervalles qui séparent les instants successifs de l'instant initial : la vitesse du mobile est alors le rapport de la longueur du trajet parcouru à la durée du parcours, quand ce rapport est constant ; et l'équation du mouvement, relation où entre la vitesse, donne l'espace parcouru après un temps donné. Si l'on désigne par e l'espace parcouru, par t le temps de parcours et par v la vitesse, on a les relations équivalentes $e = vt$, $v = \frac{e}{t}$, $t = \frac{e}{v}$, qui permettent de calculer l'une quelconque des trois quantités à partir des deux autres.

Nous n'avons pas à insister ici sur les complications qui résultent de la courbure des trajectoires, ou des variations de la vitesse, c'est-à-dire de l'« accélération » du mouvement ; ce sont des problèmes que nous retrouverons plus tard.

Ajoutons seulement que ce que nous avons dit de deux points est vrai de deux systèmes de points conçus chacun comme indéformables, et qui sont susceptibles de se mouvoir en bloc l'un par rapport à l'autre ; et que pour se représenter facilement les mouvements et les étudier avec toutes les ressources de la géo-

métrie analytique, on les rapporte, en cinématique, à des axes conçus comme fixes et qui constituent un « système de référence » pour les mouvements considérés.

8. Réciprocité du mouvement en cinématique abstraite. —

Bien que l'idée du mouvement d'un point ne soit complète qu'avec toutes les déterminations que nous avons dites, il faut cependant en signaler une forme dégénérée, dans laquelle on considère simplement deux points dont la distance varie progressivement au cours du temps, sans qu'on attribue à aucun des deux la fixité.

Qu'une telle idée soit incomplète et appelle des déterminations pour être utilisable dans une étude plus poussée, c'est incontestable. Pourtant telle qu'elle est, elle offre à l'esprit un sens précis, et c'est assez pour qu'il faille la noter, d'autant que l'indétermination dont elle souffre n'empêche pas d'affirmer qu'il y a mouvement, et que, dans l'ordre réel même, il arrivera qu'on ne sache qu'une chose au sujet de deux corps, à savoir la variation continue de leur distance : auquel cas il faudra bien dire qu'on est en présence d'un mouvement sans pouvoir préciser davantage. Cette notion trop abstraite et par suite inachevée, a du moins le mérite de mettre en pleine lumière l'un des caractères extérieurs du mouvement, l'un des aspects de sa *relativité*. Elle se réduit à une variation de distance : or la distance est une relation qui par elle-même ne confère de privilège à aucun des deux points qu'elle concerne. A est à un mètre de B ne dit rien de plus ni de moins que B est à un mètre de A. La variation de distance ne saurait avoir un autre caractère, et dire que A se meut par rapport à B, ou B par rapport à A, c'est exprimer la même chose, au moins du point de vue trop abstrait où nous sommes : et le mouvement ainsi conçu est une relation réciproque. Toutefois, nous l'avons dit, on ne saurait pousser l'étude d'un tel concept, ni l'utiliser dans une construction plus ample, sans le guérir d'abord de l'indétermination qui le frappe. C'est pourquoi la cinématique se donne d'emblée sur l'axe où se meut le point mobile une origine fixe : en tant que concept achevé, le mouvement est ici le déplacement continu d'un point mobile par rapport à un point fixe. La variation de distance en demeure le signe révélateur et le seul aspect directement imaginable ; mais elle a reçu désormais son interprétation : c'est tel point qui se meut, et non l'autre ou les deux ensemble. La réci-

procité de tout à l'heure est-elle disparue pour autant ? Non, car elle se retrouve toute dans la variation de distance, d'abord ; ensuite elle se traduit par ce fait que pour échapper à l'indétermination il a fallu invoquer des raisons étrangères à la relation primordiale. Dans la construction abstraite, c'est par convention que l'on attribue la fixité à l'un des deux points : aussi se souvenant de cet arbitraire, on pourra, si la commodité du calcul le réclame, remplacer la première convention par son équivalent ; on fera du point fixe le point mobile, et *vice versa*, quitte à changer le signe du mouvement quand on le conçoit sur un axe orienté. Nous verrons que dans l'interprétation de mouvements réels qui par hypothèse apparaîtraient sous l'aspect immédiat d'une simple variation de distance, il faudra aussi des raisons extérieures à cette donnée brute pour échapper à l'ambiguïté, et pouvoir dire que l'un des deux corps est fixe et que l'autre se meut. A la racine de tous les problèmes de discernement des mouvements réels, nous retrouverons la réciprocité dont il vient d'être question.

9. Le concept d'entraînement et la relativité des vitesses. — Si l'on appréciait toujours le mouvement d'un mobile en se référant directement à des axes fixes, la cinématique présenterait une grande simplicité. Or une complication survient, dont l'expérience encore a suggéré l'idée. Une mouche se meut sur une porte qu'on ouvre : elle a sur la porte et par rapport à des points liés à la porte son mouvement à elle ; mais en même temps elle participe à la rotation de la porte autour de ses gonds. A son mouvement *propre* se joint un mouvement d'*entraînement* ; et de ces deux mouvements résulte le mouvement de la mouche par rapport aux murs de la chambre. Ce mouvement *résultant* peut sans doute s'apprécier directement par rapport aux murs. Mais il sera équivalent, et du reste plus intelligible quant au résultat, et plus facile quant au procédé, de le déterminer indirectement par la combinaison des deux autres mouvements. La cinématique s'est emparée de cette notion d'un mobile qui, tout en ayant son mouvement à lui par rapport à tel système de référence, est en même temps transporté, avec tous les points de ce premier système, dans un autre mouvement défini par rapport à un système extérieur. On peut ainsi parler du mouvement d'un point relativement à des axes eux-mêmes mobiles ; ces axes constitueront un premier

système de référence en mouvement par rapport à un autre qui, lui, sera fixe. On conçoit du reste que la série des systèmes qui se meuvent ainsi les uns par rapport aux autres puisse comporter un nombre quelconque de termes. De la combinaison de mouvements propres et de mouvements d'entraînement résulte une conséquence : c'est qu'un même mobile a des vitesses différentes suivant le système d'axes auquel on rapporte son mouvement : autrement dit, la vitesse — et donc aussi l'accélération — d'un mobile est chose relative, relative au système adopté. Cette relativité ne soustrait pas la vitesse à l'emprise du calcul : on peut établir des conventions simples suivant lesquelles se fera la combinaison du mouvement propre et du mouvement d'entraînement pour donner le mouvement résultant. L'expérience a suggéré une formule qui conduit à faire simplement la somme géométrique des vitesses composantes pour obtenir la vitesse résultante : Soit o la position à un

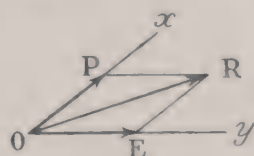


Fig. 1.

moment donné d'un point soumis, dans le plan de la figure, à un mouvement propre et à un mouvement d'entraînement (fig. 1) ; soient ox la direction et le sens du mouvement propre, et sur ox oP une longueur qui mesure à une certaine échelle la vitesse de ce mouvement ; soient oy la direction et le sens du mouvement d'entraînement et sur oy oE , une longueur qui soit à la vitesse de ce mouvement ce que oy était à la vitesse propre. Les deux « vecteurs » oP et oE permettent de former un parallélogramme dont la diagonale oR donne la direction et le sens du mouvement résultant du point à partir de o , et dont la longueur représente la vitesse résultante à la même échelle que oP et oE représentaient les vitesses correspondantes.

N'insistons pas présentement sur les combinaisons cinématiques auxquelles va donner lieu la notion d'entraînement appliquée aux accélérations. Avoir énoncé le principe suffit à notre dessein actuel. Mais signalons que la relativité des vitesses et des accélérations, qui apparaît comme un fait objectif, puisqu'une expérience vulgaire nous la révèle, ne pourra que compliquer dans certains cas le problème de l'interprétation des mouvements réels.

10. Systèmes de référence privilégiés et mouvements absolus. —

En cinématique constructive, où l'on ne peut laisser subsister aucune indétermination dans les données quand on veut résoudre un problème, on limite toujours la série des systèmes qui s'entraînent successivement : on se donne, ou l'on suppose, un système fixe, lequel en vertu de cette fixité est privilégié par rapport aux autres. Privilégié en ce sens que dans la construction que l'on fait c'est de lui qu'on part : on s'appuie sur lui pour définir le mouvement du premier système mobile, puis sur celui-ci pour définir le mouvement du deuxième système, et ainsi de suite, jusqu'au mobile qui n'est plus que cela. La hiérarchie des systèmes possède ainsi une base solide qui satisfait la pensée, car tous les mouvements considérés sont en définitive, bien que d'une manière indirecte, conçus par rapport au système fixe. Pour reprendre l'exemple cité plus haut, le mouvement de la mouche se trouve rapporté par l'intermédiaire de la porte aux murs de la chambre. Si l'on considère la chambre comme fixe, on dira que la mouche se meut sur la porte d'un mouvement relatif, et dans la chambre d'un mouvement *absolu*, absolu, s'entend, par convention, dans le cas présent où sans chercher à savoir si la chambre se meut on la considère comme fixe. On entrevoit dès maintenant comment cette notion de système privilégié se présentera dans l'interprétation des mouvements réels : aura-t-on des raisons non pas de considérer comme fixe par convention ou parce que c'est commode, mais de déclarer absolument fixe quelque système de référence auquel rapporter le mouvement des corps ? Nous aurons à dire bientôt comment la question se précise.

11. Les notions fondamentales de la dynamique : force, masse, liaison. — Les combinaisons de mouvements qu'admet la cinématique sont soumises à certaines conditions restrictives, mais qui viennent toutes soit de la notion de mouvement elle-même : — il faut bien que les mouvements conçus soient soumis à quelque loi pour faire partie d'une construction — ; soit des propriétés ou de la complexité que l'on attribue au temps et à l'espace — : les mouvements d'un point assujetti à demeurer sur une droite par exemple, sont plus restreints que ceux d'un point libre de se mouvoir dans tout un plan. La dynamique, même abstraite et constructive, va restreindre autrement les possibilités de mouve-

ment des points. Pour elle un point mobile n'est plus un point qui obéit sans résistance quand par la pensée on veut lui supposer un mouvement quelconque par rapport à tel système : c'est un point soumis à une *force*, d'abord, c'est-à-dire à une exigence de déplacement dans telle direction et avec telle intensité, et capable ensuite de résister suivant un certain coefficient qu'on appelle sa *masse* à cette exigence de déplacement ; si bien que l'accélération qu'il prendra dépend à la fois et inséparablement de cette masse et de cette force. Sans doute on peut toujours trouver des combinaisons de forces et de masses qui donnent lieu à un mouvement donné, quel qu'il soit, quand ce mouvement est conçu isolément. Mais si, comme il le faut bien dans une construction, on veut accorder aux masses et aux forces une certaine fixité, ou du moins soumettre à une loi leurs variations, on n'est plus maître des mouvements qui vont s'ensuivre, même dans le cas d'un seul point, *a fortiori* dans le cas de plusieurs points doués chacun de leur masse et soumis d'une part à des forces qui tendent à les mouvoir, et d'autre part, comme on le fait souvent, à des *liaisons* qui, tendant à les maintenir dans telle relation avec les autres points d'un système, limitent leurs déplacements. Ces notions nouvelles sont, bien entendu, empruntées elles aussi à l'expérience : la résistance à l'ébranlement qu'offre un petit caillou quand on le heurte du pied n'est pas aussi grande que celle d'une grosse pierre, et c'est là une origine possible de la notion de masse ; l'effort fourni par l'index qui se détend est moindre que celui qui met en œuvre tout le bras ; et l'idée de forces plus ou moins intenses a pu venir de là ; enfin beaucoup de mouvements des corps — nous ne disons pas tous — sont manifestement dus à l'intervention de forces et déterminés à la fois par ces forces et par les masses, à moins que des liaisons matérielles — glissières, articulations, fils à peu près inextensibles... — n'y ajoutent leur influence : de là naît la notion d'un *enchaînement causal* des mouvements réels : les conditions restrictives que la dynamique apporte aux mouvements qu'elle conçoit ne font que refléter abstraitemment et préciser l'enchaînement objectif, au moins soupçonné, des mouvements des corps.

12. En dynamique on ne regarde comme réels que les mouvements des masses ébranlées par des forces. — En quoi ces consi-

dérations d'un nouveau genre vont-elles modifier les données purement cinématiques exposées plus haut ? Il est facile de montrer que la question de la réciprocité du mouvement va changer complètement d'aspect. Recourons d'abord à un fait vulgaire interprété selon le bon sens : je lance en l'air un caillou ; si j'apprécie même de façon peu précise l'effort que j'ai déployé, par comparaison avec d'autres forces que je puis connaître, et si je compare la masse du caillou à celle de la Terre par exemple, je vois que mon effort était capable de mouvoir le caillou, mais pas d'une manière appréciable la Terre, ni *a fortiori* tout l'Univers matériel. Or, au seul point de vue cinématique de la *description* du phénomène, il est équivalent de dire que le caillou s'est déplacé par rapport à la Terre, ou mieux par rapport au reste du monde ; ou que la Terre avec tout le monde, s'est déplacée en sens contraire par rapport au caillou resté fixe ; ou enfin qu'il y a eu déplacement partiel de part et d'autre : c'est là en effet la réciprocité radicale du mouvement simplement décrit ou du mouvement conçu. Mais la considération des forces productrices du mouvement nous permet d'échapper à l'ambiguïté : pour le vulgaire, le caillou seul aura bougé, et, pour le physicien, si, comme nous aurons à le dire, l'effort n'a pas laissé la Terre, ni même le monde, rigoureusement immobiles, du moins a-t-il communiqué au caillou la plus grande part du déplacement relatif observé. L'exemple que nous venons d'invoquer suggère, on le voit, une définition du mouvement vrai par opposition au mouvement relatif qui en est la contre-partie. Voici comment on peut la formuler en dynamique abstraite : si, lorsque deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre, l'un des deux déplacements est l'effet d'une force, c'est le corps qui subit l'action de cette force qui se meut effectivement. Nous aurons à préciser plus tard cette définition, à la corriger même ; retenons-la cependant, car, telle quelle, nous pourrions l'utiliser pour distinguer dans beaucoup de cas les mouvements vrais des mouvements relatifs réciproques, et pour débayer le terrain en vue d'une étude approfondie de notre problème. Notre exemple contient encore un autre enseignement : il nous suggère aussi l'idée d'une fixité au moins approchée qui tient à la grandeur de la masse relativement aux forces mises en œuvre, et corrélativement d'une mobilité qui tient à la petitesse relative de la masse. Conformément à ces

concepts, la Dynamique abstraite ne pourra plus, logiquement, admettre d'autre fixité ou quasi-fixité, dans le système où elle établit ses constructions, que celle d'une masse très grande ni d'autres mouvements vrais que les mouvements capables d'être subis par les masses des mobiles sous l'action des forces considérées. En fait, les théoriciens de la Dynamique se donnent souvent sans préciser des points ou des corps « fixes » : s'ils ne le disent pas explicitement ils sous-entendent alors qu'ils sont de masses telles que les forces mises en jeu dans le problème ne peuvent les déplacer d'une manière appréciable ; et quand ils veulent justifier explicitement la fixité absolue qu'ils attribuent à certains corps, ils disent qu'ils sont de masse « infinie », ce qui est une façon de parler permise seulement dans l'abstrait bien entendu. Ajoutons que tout cela s'applique au cas de mouvements subordonnés : en Cinématique, c'est par convention qu'on regardait tel système comme fixe et privilégié et tel autre comme entraîneur. La répartition des rôles n'est plus arbitraire en Dynamique : c'est ainsi que pour en revenir à un cas concret, la porte sera dite entraîner la mouche, parce que celui qui la pousse peut la mouvoir et l'insecte avec elle ; que la mouche sera considérée comme un simple mobile, ses efforts ne pouvant faire autre chose que la mouvoir sur son point d'appui et qu'enfin la chambre qu'aucune des forces considérées ne peut mouvoir joue, pour cette raison, le rôle de système fixe, et par suite de système privilégié en ce sens nouveau que les mouvements à lui rapportés sont des mouvements réels, c'est-à-dire causés par des forces assignables et que directement ou non, il leur sert à tous de point d'appui. Nous ne saurions sans anticiper sur la suite de notre étude développer davantage les conceptions de la Dynamique même constructive, d'autant qu'ici la théorie s'est maintenue en contact étroit avec les données réelles, bien plus que dans les domaines moins complexes de la Géométrie ou du mouvement pur. Mais nous avons dit l'essentiel, à savoir que les mouvements relatifs de deux points ou de deux systèmes qui en Cinématique pouvaient s'interpréter par le déplacement de l'un quelconque des deux termes, ou même des deux à la fois et suivant une loi de répartition arbitraire, n'admettent plus en Dynamique qu'une interprétation déterminée : *les mouvements vrais sont ceux que peuvent prendre dans le système où l'on s'établit, les corps en présence, selon le rap-*

port de leurs masses, sous l'action des forces données et en tenant compte de leurs liaisons s'il y a lieu. On n'aura pas de peine à conclure dès maintenant que dans l'interprétation des mouvements réels les considérations dynamiques joueront un rôle de premier plan et que si la relativité des mouvements observés doit faire place à une détermination des mouvements réels, c'est pour des raisons dynamiques surtout qu'elle cèdera.

13. Nomenclature provisoire pour le discernement des mouvements réels. — Complétons ces préliminaires par une nomenclature qui, pour n'être pas définitive, nous servira grandement dans notre exposé : si l'on veut qualifier dans tous les cas et d'une façon aussi simple que possible les mouvements définis du point de vue dynamique, on peut adopter les dénominations suivantes, qui supposent l'idée d'un système absolu et d'une hiérarchie de systèmes entraîneurs. D'abord en général sont réels les mouvements expliqués par leurs causes : — mouvement d'un train sur la terre, d'un homme dans le couloir d'un train — ; et seulement apparents les mouvements relatifs réciproques des mouvements réels — fuite du remblai par rapport au train et du wagon par rapport à l'homme ⁽¹⁾. Ensuite un mouvement réel produit directement dans le système absolu est réel et absolu : mouvement d'un animal sur la terre si l'on admet que la terre est absolument fixe dans le monde comme le faisaient les anciens et comme le sens commun le fait encore spontanément. Un mouvement réel produit dans un système mobile est réel et relatif : rotation sur ses gonds de la portière d'un train en marche, ou déplacement d'une mouche sur cette portière.

Enfin le mouvement complexe qui tiendra à ce qu'un corps, outre son déplacement réel propre, est soumis à un ou à plusieurs entraînements réels, s'appellera un mouvement résultant réel, mouvement résultant absolu s'il se rapporte au système absolu, — mouvement de la mouche, ou de la portière relativement à la terre, dans les exemples qui précèdent — ; mouvement résultant

⁽¹⁾ Nous montrerons bientôt qu'un premier discernement s'impose entre les « apparences visuelles » de mouvement, dues à la perspective ; et les déplacements relatifs tangibles qui leur correspondent ; nous supposons ici, pour simplifier, que les effets de perspective sont déjà corrigés selon les exigences du toucher.

relatif s'il est défini par rapport à un système encore mobile, — mouvement de la mouche sur la portière qui tourne, relativement au train en marche.

Les définitions qui précèdent vont nous permettre d'aborder l'étude des mouvements concrets. C'est finalement en philosophes que nous devons les considérer ; mais selon nous la métaphysique du mouvement ne saurait trouver meilleur appui que les sciences du mouvement ; or ces sciences ont pour point de départ les perceptions ou sensations qui nous font dire que tels corps se meuvent relativement à tels autres. Commençons donc par l'étude des sensations de mouvement.

ARTICLE II

LES SENSATIONS DE MOUVEMENT ET LEUR INTERPRÉTATION COURANTE

14. Le temps et l'espace de la perception. — Si les sciences abstraites du mouvement dont nous venons de rappeler les principes élémentaires ont pris le vaste développement et obtenu le succès durable que l'on sait, c'est moins pour la beauté de leurs constructions sans doute que pour leur aptitude à fournir une interprétation cohérente du réel. Aussi bien les notions fondamentales qu'elles précisent sont-elles implicitement utilisées en fait par tous les hommes dès qu'ils réfléchissent sur les données sensibles immédiates et cherchent à les comprendre en les interprétant. On entend bien ce que signifie ce mot d'interprétation : l'esprit humain ne se contente jamais des aspects fragmentaires du monde que lui apportent les sens ; pressentant des rapports intelligibles, c'est-à-dire conformes à ses exigences propres, entre ces morceaux séparés, il cherche invinciblement à en reconstituer la synthèse ; or l'un des éléments primordiaux de cette reconstruction, c'est, après la nature essentielle des êtres eux-mêmes considérés isolément, la façon dont ces êtres se succèdent dans le « temps » et se groupent dans l'« espace », ou, ce qui réunit les deux points de vue, les lois suivant lesquelles ils se situent ou se meuvent les uns par rapport aux autres. C'est l'une des tâches de la science et de la philosophie de reconstruire ainsi l'ordre universel le plus

extérieur, au moins dans ses grandes lignes. Les simples exigences de la vie imposent un travail analogue, moins ample et moins profond sans doute, mais où soient satisfaites déjà les exigences de la raison. Montrons donc, — brièvement, car c'est seulement pour nous un moyen de préparer l'énoncé du problème qui nous occupe — montrons comment l'on interprète couramment les sensations immédiates de mouvement : on va voir que les notions premières de la Cinématique et de la Dynamique ne sont totalement ignorées de personne.

Nous croyons d'abord, selon les théories dites nativistes, que la sensation de mouvement est une donnée primitive, non moins que les sensations d'étendue et de durée. Pour tout le monde un corps se meut quand sa position dans l'« espace » change de façon continue au cours du « temps ». Que faut-il entendre ici par les mots de temps et d'espace ? Il est clair qu'il ne s'agit plus de séries d'instants abstraits, ni de simples lignes géométriques servant de trajectoires à des mobiles idéaux ; mais bien d'aspects, ou d'éléments, de la réalité physique. Pourtant, le Temps et l'Espace ainsi entendus ressemblent, et pour cause, à leurs homologues abstraits. On pourrait dire que de part et d'autre les *relations* fondamentales sont les mêmes, et les lois de synthèse progressive aussi, mais que les *termes* de l'Espace et du Temps physiques se rattachent à des réalités concrètes au lieu d'être de pures abstractions comme dans les séries construites.

Pour le Temps, on le symbolise par une suite discontinue de phénomènes dont on a des raisons d'admettre le retour périodique : rythmes de la vie corporelle ou de quelque mouvement extérieur pour les perceptions individuelles et de courte durée ; années, jours et fractions du jour pour la vie sociale et les longues périodes du devenir. Il suffit de choisir l'un de ces phénomènes comme repère pour pouvoir dater tous les autres : c'est à quoi servent les dates de l'histoire pour l'ensemble, les indications du calendrier ou des horloges pour le détail. Mais la suite de phénomènes qui symbolise le Temps ne saurait le constituer, d'autant qu'elle est en partie conventionnelle, et que de nombreux événements ont mêmes dates dans cette suite, autrement dit sont simultanés. Pour atteindre les termes véritables de la série du temps physique, il faut d'une part réunir en groupes distincts tous les événements simultanés, et faire de chacun de ces groupes

un *état* transitoire de l'Univers ; et d'autre part concevoir ces états comme instantanés, seul moyen d'introduire, du moins en principe, dans la distribution temporelle des événements une précision absolue. En fin de compte le Temps physique est la suite régulière des instants qui correspondent aux états successifs de l'Univers. On sait que d'après les idées reçues cette série jouit de la même continuité virtuelle que nous avons attribuée au Temps abstrait, ce qui ne veut pas dire qu'un Temps physique discontinu soit inadmissible.

S'il y a eu un commencement du monde, l'instant correspondant à l'état initial a été le premier instant du temps réel ; et comme tout instant est nécessairement pour nous élément d'une série, nous pouvons concevoir *avant* l'instant initial du temps réel d'autres instants où il n'y avait rien ; mais ces instants ne sauraient appartenir qu'à un Temps imaginaire, ou simplement possible. Par ailleurs il y aurait beaucoup à dire sur les rapports du Temps physique avec la réalité positive totale, qui n'est rien de moins qu'un monde en évolution. Mais l'examen de ce problème sera mieux placé vers la fin de notre étude.

Si tout était au repos dans le Monde, l'Espace physique pourrait être rattaché à un système de points liés eux-mêmes aux positions de certains corps, et l'on situerait tous les autres corps dans ce système, et relativement aux corps pris pour repères, comme on date tous les événements par rapport à l'événement origine dans la série symbolique des années, des jours ou des heures. En fait il y a des corps qui se meuvent. Si malgré tout il en restait d'immobiles, le système de points dont nous venons de parler demeurerait concevable, et le procédé correspondant de localisation praticable. Il faudrait ajouter seulement que pour les corps mobiles on ne peut parler que de positions transitoires ; que pour obtenir l'espace réel dans sa totalité il faut y intégrer toutes les positions successives des corps mobiles ; et qu'enfin pour réaliser le maximum de précision on doit concevoir les corps étendus comme des ensembles de points dont chacun occupe à tel instant une position elle-même ponctuelle dans le système représentant l'Espace.

Que si au contraire il fallait admettre que tous les corps se meuvent, c'est encore à des positions, transitoires cette fois, de certains corps, qu'on devrait rattacher de quelque manière le système des points de l'Espace. Mais dire à quelles positions, et

de quelle manière, c'est comme on le verra tout notre problème. La réponse viendra plus tard, et plus tard aussi notre définition de l'Espace physique, de ses limites, et de ses rapports avec la réalité complète.

Pour le moment rappelons seulement que dans l'interprétation courante du réel dont nous allons nous occuper d'abord, la Terre est regardée comme immobile, et que par conséquent l'Espace de la perception lui est lié : c'est donc relativement à elle qu'on situe les corps immobiles et qu'on définit les trajectoires des corps en mouvement. Dans tout ce qui va suivre immédiatement et sauf indication contraire, nous entendrons donc par repos et par mouvement ce que tout le monde entend, à savoir le repos ou le mouvement par rapport à la Terre, et aussi par rapport au Ciel ; car le mouvement d'ensemble du Ciel par rapport à la Terre et les mouvements dans le Ciel des astres errants, sont trop lents pour être l'objet d'une perception directe : ils sont l'objet d'une conclusion et nous en parlerons plus tard.

15. Interprétation des mouvements perçus par le toucher. —

Les sensations de mouvement relèvent du toucher, de l'ouïe et surtout de la vue. Commençons par le toucher dont le cas est de beaucoup le plus simple. Il y a d'abord des sensations de mouvement qui ne se laissent interpréter que d'une seule manière, ce sont celles où nous sentons nos muscles se mouvoir par rapport à l'ensemble de notre corps : ce qui révèle ici sans ambiguïté la partie mue, c'est le sentiment de l'effort musculaire employé à la mouvoir ; quand je lève le bras je sais qu'il se meut réellement. Il faut pourtant signaler que même dans ce cas privilégié la réciprocité du mouvement est toujours prête à reprendre ses droits : pour peu qu'on perde le sentiment de l'effort accompli, on ne saura plus où est le vrai mouvement ; si l'on frotte ses deux mains l'une contre l'autre sans d'ailleurs les regarder on oubliera facilement le mouvement de l'une d'elles — celui qui a le moins d'amplitude — pour ne plus attribuer qu'à l'autre le déplacement.

Quand des points différents de la peau sont impressionnés par le contact d'un objet successivement, et d'une façon continue au moins pour la perception qui lie les impressions élémentaires, il y a sensation de mouvement relatif de l'objet et du corps. On peut concevoir des cas où l'on ne sache pas si le corps est immobile

ou non ; alors on ne saura dire où est le mouvement vrai ; il y aura perception de mouvement relatif sans autre détermination : cela arriverait par exemple si étant dans une barque on appuyait légèrement la main sur le bord d'une autre barque ; la même sensation de glissement pourrait résulter du mouvement de l'une quelconque des deux barques ou même des deux à la fois.

Mais d'ordinaire on pourra user de raisons d'ordre dynamique pour lever l'indétermination ; on saura que le corps est immobile et que l'objet peut se mouvoir par rapport à lui : soit une mouche qui se promène sur le front ; ou au contraire on saura que le corps se meut et que l'objet est immobile : soit une rampe que l'on sent glisser sous sa main en descendant un escalier ; alors l'interprétation est aussi nette que facile. On pourra penser d'autres fois qu'il y a mouvement de part et d'autre : soit une branche flexible qu'on a ployée en passant et qui se détend en même temps qu'on s'avance en la frôlant : la répartition exacte des mouvements réels est dans ce cas chose à peu près impossible. Une autre façon moins directe et plus rare de percevoir un mouvement consisterait dans ce fait que pour maintenir une impression de contact au même endroit de la peau, il faudrait déplacer la partie impressionnée d'une façon continue, ce qui serait évidemment l'indice d'un mouvement égal de l'objet touché. On voit que dans tous ces cas la considération des causes du mouvement joue le rôle principal dans l'interprétation des mouvements sentis ; on peut dire que les sensations tactiles par elles-mêmes ne révèlent que des déplacements relatifs ; mais que la pensée qui se mêle à toute perception chez les adultes intervient normalement pour faire connaître les mouvements réels que ces déplacements relatifs supposent, à savoir ceux que des efforts sentis ou des forces extérieures peuvent produire, et qui d'ordinaire se font relativement aux points d'appui des forces supposées. Ajoutons qu'il n'est pas toujours nécessaire de percevoir les forces au moment même où le corps se meut, puisque dans le cas des projectiles, l'effet moteur de la force dure encore quand elle a cessé d'être appliquée au mobile : il suffira donc de savoir qu'une impulsion est intervenue pour conclure à la réalité du mouvement. Parfois cependant on n'usera point de ces principes d'interprétation, faute de connaître d'abord les forces : si par exemple on est sûr d'être soi-même au repos et qu'on éprouve une sensation tactile

de mouvement, on conclura d'emblée au mouvement réel d'un objet extérieur ; on pourra bien ensuite rechercher quelles forces ont pu le produire, mais le mouvement lui-même aura été perçu comme réel sans recours préalable aux forces productrices ⁽¹⁾.

16. Interprétation des mouvements perçus par l'ouïe. — L'ouïe nous révèle directement sous forme de sons les vibrations des corps. Ces mouvements de molécules ne nous intéressent pas pour l'instant ; sauf dans le cas — sur lequel nous n'insisterons pas — où des variations continues de l'intensité ou même de la hauteur du son perçu auraient pour cause un mouvement de la source sonore par rapport à l'oreille.

Mais souvent et d'une façon plus simple, nous saurons, grâce à l'ouïe, qu'un corps se déplace en bloc, parce que son mouvement d'ensemble dans l'air ou sur le sol apparaît comme la cause des vibrations que nous entendons. C'est ainsi que les obus s'annoncent en sifflant dans l'air, et les voitures en faisant résonner la chaussée. Passer du son perçu au déplacement de masse qui le provoque suppose un raisonnement ; et l'on va se demander comment raisonner sur des données purement auditives.

C'est que nous projetons dans l'espace tel que nous ont appris à le connaître le toucher et la vue les causes des sons qui nous parviennent : je « vois » le camion courir sur la route en même temps que je l'entends rouler. L'espace visuel ou tactile ainsi évoqué par association substitue sa netteté à l'imprécision de l'espace auditif, ce qui facilite l'interprétation des mouvements révélés par l'ouïe. Il faut observer du reste que les déplacements ainsi perçus ne sont pas définis par rapport à notre corps, mais bien par rapport aux milieux matériels qui nous apportent les vibrations sonores, particulièrement à l'air. En général il n'y a place pour aucune ambiguïté dans l'interprétation : le sifflement entendu est dû au mouvement réel du projectile. Cependant le vent qui est un transport

(1) Nous ne ferons que mentionner la perception indirecte d'un mouvement dans lequel on est emporté par les sensations des secousses que ce mouvement provoque : c'est le cas d'un voyageur qui ferme les yeux dans un train en marche. Les secousses désordonnées et continues qu'il éprouve peuvent s'interpréter comme l'effet d'un mouvement continu dans le sens véritable de la marche ou dans le sens contraire ; ou bien comme l'effet d'un balancement sur place. Une telle perception du mouvement est ce qu'il y a de plus vague.

de l'air lui-même peut produire un sifflement en heurtant un corps fixe ; c'est l'un des rares exemples où l'appel à d'autres données soit nécessaire pour l'attribution du mouvement perçu par l'ouïe.

17. Complexité des données visuelles. — Quand les sensations de mouvement sont fournies par les yeux, le problème se complique pour plusieurs raisons : le toucher n'avait pour objet que des corps au contact ; la vue porte au loin et atteint des objets dont on pourra bien plus facilement ignorer s'ils peuvent ou non se mouvoir réellement : — on pouvait dissocier aisément les sensations tactiles des diverses parties du corps ou n'en laisser subsister ou n'en considérer qu'une seule ; le champ visuel comporte presque toujours une multiplicité d'objets ; — les corps touchés se situaient sur une même surface, celle de la peau ; les corps visibles peuvent être répartis sur des plans nombreux, plus ou moins éloignés ; — l'immobilité ou le mouvement de tout l'organisme ou d'un membre étaient faciles à percevoir ; de petits mouvements des globes oculaires peuvent échapper à la conscience ; enfin le mouvement des sources lumineuses relativement aux objets éclairés fait que les taches de lumière projetées par elles, et corrélativement les ombres, « se déplacent » dans le champ visuel. Autant d'éléments dont il faudra tenir compte dans l'interprétation des données immédiates.

18. Les variations d'éclairement, simples indices de mouvements matériels. — Écartons d'abord le cas des taches de lumière et des ombres qu'on dit se déplacer : ce ne sont pas là de vrais mobiles. Il y a des variations d'éclairement des corps, simples changements d'état qui peuvent se faire d'une manière progressive dans le temps et dans l'espace et qui font penser au mouvement d'un corps matériel : en réalité ce ne sont pas des mouvements ; il y manque cette condition à laquelle on reconnaît le mouvement vrai, que le toucher pourrait le percevoir si l'on était sur place. Sans insister, puisqu'aussi bien personne n'est dupe de telles apparences, notons cependant que le « déplacement » des lumières et des ombres est toujours l'indice d'un mouvement matériel qui reste à déterminer et qui peut affecter soit la source, soit le corps éclairé, soit les milieux matériels transparents que traverse la

lumière, ou les surfaces qui la réfléchissent, ou encore dans le cas des ombres, les corps opaques interposés : le problème des éclipses se présente de cette façon tant que l'on ne connut pas les vrais mouvements relatifs des astres. Sans nous arrêter au cas de sources lumineuses qui manifesteraient leur éloignement ou leur approche par une diminution ou une augmentation régulière de leur intensité, demandons-nous maintenant comment l'on peut débrouiller les données de la vue, là même où n'intervient plus aucune variation de l'éclairement des corps ? Il nous faut sérieusement les problèmes.

19. Interprétation des sensations visuelles de mouvements quand les yeux sont immobiles. — Supposons d'abord le corps et l'œil du sujet immobiles relativement à l'ensemble des objets du champ visuel, c'est-à-dire le plus ordinairement relativement à la Terre et au ciel, comme nous l'avons expliqué ; et admettons que l'un de ces objets se meuve réellement. Certaines régions de la rétine subiront des changements continus d'impressions, et ce sera la sensation visuelle du mouvement. Dans ce cas, la rétine a les mêmes privilèges que la peau sensible aux contacts, et la vue est bien alors, en ce qui concerne le mouvement, comme un toucher à distance. Effectivement quand nous éprouvons de ces changements continus d'impressions lumineuses, nous concluons à des mouvements des objets visibles : seulement il les faut interpréter. Les mouvements sentis par le tact étaient relatifs au corps du sujet. Ici, à quels repères sont-ils rapportés ? D'ordinaire le champ visuel embrasse un ensemble de corps et l'on sait en général lesquels jouissent de l'immobilité. Si l'on a pour horizon le ciel, ou des champs ou des maisons, et qu'on voie s'agiter sur ce fond la cime d'un arbre, on dira que l'arbre a bougé. Pourquoi ? Parce qu'on sait bien que ni les champs ni les maisons ne peuvent être déplacés par rapport à l'ensemble du globe, et que le ciel lui-même reste fixe par rapport à la Terre dans le temps d'une perception. Dès lors sans même savoir la cause de l'agitation de l'arbre — coup de vent ou envol d'oiseau — on n'hésitera point à dire qu'il a remué par rapport à tout le reste. Que si la vue n'atteignait aucun objet qui puisse passer pour fixe à coup sûr, l'indétermination due à la réciprocité radicale du mouvement brut subsisterait : c'est le cas de quelqu'un qui de la côte verrait

au loin deux navires se rapprocher l'un de l'autre ; l'eau agitée ni le ciel sans astres ne pouvant guère tenir lieu de repères précis, il sera incapable de répartir entre les deux navires le déplacement observé. Une telle incertitude se retrouve chaque fois que plus d'une interprétation est possible. Même si l'on sait quel est le corps fixe, on peut l'oublier dans la perception et se créer l'illusion que ce corps fixe se déplace ; qui n'a vu, en regardant l'eau d'une rivière du haut d'un pont, ce pont remonter le courant ; ou quand le vent chasse les nuages dans le ciel, la lune courir à leur rencontre ? Toutefois il faut toujours que le mouvement supposé garde un minimum de vraisemblance : le disque de la lune qui est petit peut être pris pour un mobile ; quelques étoiles aussi ; l'ensemble des étoiles ou le ciel ne le peuvent plus : nous avons trop l'habitude d'attribuer le repos aux corps de grandes dimensions. De même, on aura beau, étant debout sur le quai, voir défiler un train devant soi, on ne croira jamais que le train est au repos et qu'on se meut soi-même. Mais si l'on est dans un train au repos, et qu'on voie défiler les wagons d'un autre train, on pourra très bien intervertir les rôles et attribuer le mouvement au train dans lequel on se trouve. Il va sans dire que dans tous ces cas si l'on pousse plus loin la réflexion, ou si l'on fait appel aux considérations de la Dynamique, soit pour réserver la fixité à certains objets, soit pour attribuer le mouvement à d'autres, une interprétation s'impose exclusivement.

Nous venons de supposer le champ visuel rempli d'objets distincts qui servent de repères nets. Si le champ est uniforme, — un ciel pur et sans astres, ou partout également brumeux, ou bien dans une chambre un plafond sans rosaces ni lézardes, — il sera plus difficile d'apprécier sur un tel fond le mouvement d'un objet isolé, faute d'un repère fixe relativement auquel on voie varier sa distance. Ainsi pourra-t-on voir immobiles un oiseau ou un avion lointains qui pourtant se déplacent.

Au lieu d'un seul objet en mouvement on peut saisir par le regard les mouvements variés et simultanés de plusieurs corps sur le même théâtre fixe : c'est le spectacle qu'offre une rue fréquentée. L'interprétation se fait toujours d'après les mêmes principes, du moins si l'on se contente d'attribuer le mouvement à certains corps et le repos à d'autres. Mais dès qu'on essaie d'apprécier et de comparer les vitesses, le problème se complique, surtout si les différents mobiles

appartiennent à des plans différents. Les mouvements se projettent en effet sur un même fond de tableau ; or à vitesses égales les mobiles les plus proches de l'œil paraîtront se déplacer plus vite sur ce fond que les plus éloignés. Ces différences sont de pures apparences de perspective et l'on a souvent à interpréter leurs complications ; mais on le fait d'après un principe général qu'on apprend vite à utiliser : la vue ne nous fournit guère, directement, que les projections des objets sur un plan perpendiculaire à notre rayon visuel ; les rapports de distance en profondeur relèvent beaucoup moins d'elle que du raisonnement. Aussi sommes-nous conduits déjà à corriger les *aspects* divers qu'offre un même objet immobile suivant le point de vue pour reconstituer sa forme géométrique réelle, c'est-à-dire celle que le toucher direct nous révélerait. De même les projections des mouvements dans le champ visuel donnent lieu à des apparences dont il faut partir pour reconstituer les vitesses et les directions réelles ; on tiendra compte dans cette reconstitution des distances qui séparent en profondeur les objets mobiles et les repères visuels ; et les mouvements vrais seront encore ceux que le toucher nous permettrait de sentir : rien n'illustre mieux la thèse bien connue que le tact est pour nous le sens fondamental. Le spectacle de plusieurs corps animés de mouvements divers est relativement simple à interpréter quand tous les corps ont seulement un mouvement propre ; plus complexe s'il s'y joint des mouvements d'entraînement. Mais ici encore on sait très bien discerner la hiérarchie des mouvements, à condition que les systèmes matériels entraîneurs soient eux-mêmes saisis d'un coup d'œil : on verra directement le receveur se déplacer dans le tramway qui l'emporte. Toutefois l'appréciation précise est ici assez délicate, car la vitesse propre d'un mobile déjà entraîné relativement au système où l'on se tient est autre que celle qui apparaît : il faut tenir compte de ce fait, et se souvenir que seuls sont bien placés pour évaluer une vitesse les observateurs qui sont au repos dans le système auquel le mouvement est immédiatement rapporté, donc ici dans le système entraîneur : c'est le cas des voyageurs du tramway par exemple quand il s'agira de la vitesse propre du receveur. On dit que ces observateurs sont privilégiés relativement au mouvement considéré, ou encore que leur point de vue, ou leur système de référence, est *privilegié*.

20. Interprétation des sensations visuelles de mouvement quand les yeux se meuvent. — Quand le corps et l'œil sont immobiles selon notre première supposition, l'interprétation des déplacements relatifs est déjà bien difficile parfois. Si l'œil est lui-même en mouvement, tout se complique davantage, et, même quand les objets du champ sont en repos, ce que nous admettrons d'abord, les mouvements apparents naissent en foule. Signalons le cas où les yeux tout seuls se meuvent : certains déplacements spasmodiques du globe oculaire donnent l'impression d'un mouvement rapide des objets, illusion du reste très fugitive. Si l'on déplace plus lentement l'œil dans l'orbite, en laissant toujours la tête immobile, on n'arrive guère à créer l'illusion d'une rotation des choses extérieures : on a sans doute trop conscience du mouvement propre de l'œil. Si par contre on tourne la tête rapidement, on voit, en dépit de toute réflexion, les choses extérieures tourner en sens contraire. Il arrive aussi que sans avoir le sentiment d'aucun mouvement de l'œil, on anime d'un déplacement lent un point qui se détache seul sur un fond uniforme : une petite tache noire sur un plafond blanc par exemple : l'illusion provient sans doute d'une rotation insensible du globe oculaire dont l'effet serait de projeter l'image de la tache en des points différents de la rétine ; et elle se trouve facilitée par l'absence de repères fixes qui attesteraient que relativement à eux la tache reste à une distance invariable. Enfin il peut se passer une chose analogue à ce que nous avons mentionné à propos du toucher : quand pour maintenir l'image d'un objet au même point de la rétine on est obligé de déplacer l'œil, de « suivre des yeux l'objet », on peut être sûr qu'il se meut : cette perception indirecte, et rarement sans mélange, n'atteint bien entendu que des mouvements assez lents, du moins en projection.

Quand le corps tout entier se déplace, l'interprétation des apparences dues au mouvement de l'œil entraîné est plus ou moins facile suivant que le déplacement du corps est senti ou non. Si l'on marche sur une route déserte et dans un paysage où tout est au repos, on sait bien qu'on est seul à se mouvoir et il semble que l'illusion contraire ne puisse se produire. Elle naît pourtant, invinciblement, dès que les changements d'aspect des choses qu'occasionne la marche sont assez rapides pour paraître continus ; or ceci dépend à la fois de la vitesse du déplacement

propre, et de l'éloignement des objets ; un mur, une grille, le long desquels on marche, ou même le sol tout proche, paraîtront fuir en arrière : mouvement apparent, relatif au corps, et qui n'empêche pas du reste le sujet de garder la conscience de son propre mouvement. L'illusion est encore plus impérieuse quand le regard embrasse, en même temps que les choses extérieures, quelque partie du corps qui sert alors de repère au faux déplacement.

Une autre apparence est un effet de perspective ; si l'on regarde en marchant les arbres plantés le long de la route, on voit leur projection sur l'horizon lointain varier à chaque instant : ils paraîtront donc se mouvoir par rapport aux objets de l'horizon. Mais inversement les objets de l'horizon pourront paraître se mouvoir relativement à des repères plus rapprochés : la multiplicité des plans fait que ces mouvements apparents sont extrêmement variés ainsi que leurs vitesses, suivant le point où se repose le regard : ce point joue le rôle d'un pivot autour duquel tournent les lignes d'objet, de façon que ceux qui sont en deçà paraissent fuir en sens contraire de la marche de l'observateur, et ceux qui sont au delà progresser dans le même sens. Toutefois tous les objets ne paraissent pas également aptes à servir ainsi de repères fixes. Il faut qu'ils soient assez éloignés pour que leur aspect ne change pas d'une façon sensible dans le temps d'une perception : par exemple des lignes d'arbres situées à l'horizon ou à mi-distance. De plus il semble qu'on ne puisse attribuer un mouvement apparent qu'à des objets relativement petits : le ciel dans son ensemble, la Terre — le sol tout proche excepté — seront toujours regardés comme immobiles. Et ces conditions restreignent quelque peu les effets de perspective dus au déplacement de l'observateur. En tout cas, sachant que l'on se meut, on apprend vite à n'attribuer de réalité qu'à son mouvement propre, et à se dire que les rapports vrais entre les objets, c'est-à-dire ceux que le toucher constaterait, demeurent invariables.

L'intervention de mouvements réels affectant certains objets compliquerait évidemment le problème, mais d'abord, sauf dans des cas particuliers, les effets de perspective, qui concernent toujours des ensembles de corps, et sont soumis à des lois assez simples, se distinguent par là-même des déplacements vrais qui peuvent être quelconques et que peuvent subir des corps isolés. On saura donc faire le discernement ; que si l'on veut ensuite

apprécier les vitesses vraies, on devra se souvenir avant tout selon une remarque déjà faite qu'elles doivent être rapportées à un système relativement auquel on est soi-même en mouvement.

Le sujet, au lieu de se mouvoir lui-même, peut être entraîné de telle façon qu'il ne sente pas le mouvement auquel il participe, et que par suite il l'ignore, ou s'il le connaît, l'oublie facilement. Tous les effets dont nous venons de parler se reproduiront alors et d'autant plus que la vitesse de déplacement sera plus grande. Si l'on est dans un train en marche, on n'échappera point à l'illusion de la fuite en arrière des objets, surtout quand on voit en même temps qu'on les regarde, le cadre de la portière : c'est ainsi que les traverses de la voie, le talus, les poteaux télégraphiques, paraissent glisser en sens contraire de la marche du train. De plus, si l'on regarde le paysage lointain, les changements de perspective font naître des mouvements apparents variés suivant les plans où le regard se fixe. Mais ces apparences s'opposent aux mouvements réels comme nous l'avons dit, et n'empêchent pas en général chez le sujet la conscience de son propre mouvement d'entraînement. L'illusion qu'on est soi-même immobile, rendue possible par le fait qu'on ne perçoit guère le mouvement du train autrement que par la vue, requiert en outre certaines conditions de vraisemblance : il faudra longer en effet un objet jugé capable de se mouvoir et auquel tout le déplacement observé puisse s'attribuer ; c'est le cas des voyageurs qui d'un wagon de chemin de fer en marche défilent devant un train arrêté : ils pourront croire que ce train est seul à se mouvoir ; mais il faut ne voir que lui : dès que l'on considère un repère situé sur un autre plan, l'illusion totale tombe ; il ne reste plus que l'illusion partielle du glissement de l'autre train, laquelle n'empêche plus de savoir qu'on se meut. On peut concevoir des cas plus complexes, comme celui d'un spectateur entraîné dans un système où il a de plus un mouvement propre : mais ni les effets de perspective, ni les illusions, ni la façon de les interpréter ne relèveraient alors d'aucun principe nouveau ; et nous n'insisterons pas.

21. Perception des mouvements en profondeur. — Nous ne dirons qu'un mot de la perception du mouvement en profon-

deur⁽¹⁾. La diversité des plans en profondeur nous est manifestée surtout par l'impossibilité où nous sommes de voir nettement d'un même regard tous les objets du champ visuel, et par la netteté privilégiée de ceux sur lesquels nous mettons successivement au point. Quant à la distance des corps en profondeur, elle est plutôt l'objet d'une perception raisonnée que d'une sensation directe : abstraction faite du toucher et de toute intervention déformante de la mémoire, elle nous est révélée surtout par des différences sensibles, soit dans la convergence des yeux, qu'on sent plus forte pour les objets plus proches, soit dans le diamètre apparent, ou mieux dans la grandeur des images rétiniennes des objets, images qui sont d'autant plus petites que les objets sont plus éloignés ; soit enfin dans la visibilité, moins nette pour les objets lointains. Une variation continue de ces éléments d'appréciation devra, théoriquement, nous déceler un mouvement en profondeur. Cependant il est assez rare qu'un tel mouvement se manifeste exclusivement de cette manière : il faut pour cela qu'il se fasse rigoureusement suivant un rayon visuel, et dans un espace vide de repères ; ce peut être le cas d'un oiseau ou d'un avion. Mais si le mouvement est tant soit peu oblique par rapport au rayon visuel, le déplacement latéral se projettera sur le fond du tableau, et cette projection variable révélera le mouvement, sans toutefois en indiquer la vraie direction ; ou bien on verra du même coup le corps et la surface continue sur laquelle il se meut et dont certaines parties sont tour à tour recouvertes et découvertes par l'objet, ce qui encore manifestera le mouvement. La variation des critères révélateurs de la distance pourra servir alors à confirmer et à préciser la première conclusion. Quand ils interviennent seuls, ces critères ne révèlent par eux-mêmes qu'un mouvement en profondeur relatif ; mais le plus souvent il sera facile, en interprétant les données toujours d'après les mêmes principes, de savoir si l'on se meut, ou si c'est l'objet, ou s'il y a combinaison de deux mouvements réels. Ajoutons enfin que même sachant qu'on se déplace ou qu'on est emporté, on peut avoir l'illusion d'un mouvement en profondeur des objets, c'est-à-dire d'un éloignement ou d'un rapprochement sur la direction que l'on suit soi-même.

(1) Sur cette question, voir R. Poirier : *Essai sur quelques caractères des notions d'espace et de temps*, Paris, 1932, chap. xv, *L'espace sensible*, p. 88 à 95.

22. Opposition du monde objectif tactile et du monde apparent visuel. — Ainsi se perçoivent le plus ordinairement, ainsi se discernent les mouvements des corps dans l'expérience courante ; les sensations visuelles nous ont conduits à distinguer les *apparences*, dues aux effets de perspective, des *réalités*, c'est-à-dire le monde de la vue de celui du toucher ou mieux du tangible ; et si l'expérience réelle suivait toujours l'ordre logique idéal, on devrait dire que ce discernement est la première tâche de la pensée dans l'interprétation du sensible. Une fois qu'on sait transposer en images tactiles les apparences visuelles, les choses sont déjà bien simplifiées ; le monde prend un aspect *objectif*, sur lequel tous s'entendent ; sur lequel aussi sont d'accord chez un même individu les données de la mémoire et les perceptions présentes, parce que précisément les différences de point de vue se trouvent abolies, et les illusions qu'elles provoquaient dissipées. Ce premier travail implique déjà l'interprétation de nombreux déplacements relatifs. Mais dans le monde tangible lui-même on peut avoir affaire à des déplacements ambigus ; et il faut savoir, quand on est en présence d'un déplacement relatif, seul observable immédiatement presque toujours, assigner à l'un des deux termes le repos, à l'autre le mouvement, ou bien répartir convenablement le mouvement entre les deux, mouvement et repos étant définis ici par rapport à la Terre comme nous l'avons dit.

De plus, pour décrire simplement le mouvement brut d'un objet, on devra souvent le dissocier en un mouvement propre et en un ou plusieurs mouvements d'entraînement, la série des systèmes matériels qui s'enchaînent ainsi ayant toujours pour dernier terme le système que l'on regarde pratiquement comme fixe et par là même privilégié, c'est-à-dire le globe terrestre. Quels principes inspirent cette reconstitution ? Nous avons indiqué les plus importants : et ce sont les mêmes qui nous ont permis déjà d'échapper aux illusions visuelles : d'abord des considérations dynamiques : la sensation ou l'absence de sensation d'effort nous révèle les mouvements ou l'immobilité de notre corps par rapport à son point d'appui actuel ; la connaissance, même peu précise, des masses et des forces extérieures, animées ou non, présentement ou non en exercice, nous permet de conclure au mouvement réel de certains corps, à la fixité de certains autres. Puis des considérations de simplicité qui conduisent à laisser toujours

aux mêmes repères universels l'immobilité ; à répartir le plus simplement possible les déplacements relatifs, ce qui se fait d'ordinaire en attribuant tout le mouvement à l'un des deux termes et le repos total à l'autre. Enfin de simples considérations de vraisemblance, où se résument toutes sortes d'inductions relatives soit à la nature des objets et à leur aptitude à se mouvoir réellement ou à être immobiles ; — une voiture, l'eau d'un fleuve, un homme, peuvent se mouvoir ; mais non un arbre, un pont ou une maison — soit à leur façon habituelle de se comporter, telle que l'expérience permet de la connaître et sans qu'on sache toujours en donner la raison : la plupart des corps tombent vers la Terre dès qu'ils ne sont plus supportés ; certains autres, la fumée, les flammes, montent vers le ciel. De plus, si l'on ne s'en tient pas au seul mouvement et à ses causes, mais que l'on tienne compte aussi de ses conséquences, ou des effets secondaires des causes qui le produisent, on sera en mesure de résoudre plus aisément et plus sûrement bien des problèmes relatifs aux données immédiates : c'est ainsi que le tourbillon de poussière soulevé par une automobile indiquera sans ambiguïté qu'elle est en marche, ou que la rotation des roues d'un train interdira de lui attribuer le repos.

Grâce à tous ces raisonnements plus ou moins explicites, le monde de notre expérience s'ordonne : les vrais déplacements relatifs se distinguent des déplacements apparents ; les mouvements réels et les repos réels se répartissent ; les mouvements résultants se dissocient et les systèmes qui s'entraînent se hiérarchisent ; bref c'est un ordre intelligible déjà qui se substitue au chaos des impressions immédiates. Pourtant nous nous sommes bornés à ce qui est directement perçu : or l'expérience commune peut, grâce à la mémoire, dépasser l'actuel, et conclure à l'existence de déplacements trop lents pour être saisis sur le fait, mais que la comparaison de positions relatives à des intervalles plus ou moins rapprochés oblige d'admettre. C'est ainsi que se révéleront sur Terre les mouvements de crue ou de décrue des eaux, ou les lentes déformations des objets, et surtout dans le ciel les mouvements des astres. Il est clair qu'une fois reconstitués dans leur continuité objective, ces mouvements, dès lors identiques à ceux que l'on peut percevoir, s'interprètent d'après les mêmes principes que ceux-ci, et viennent compléter harmonieusement en la pro-

longeant dans le passé et dans l'avenir, la représentation que se font spontanément les hommes des mouvements réels dans le monde. Reste à savoir maintenant si la science en poussant plus loin ce premier travail d'organisation va pouvoir conserver, d'abord, tous les résultats admis sans difficulté dans la conception vulgaire, ensuite ce qu'elle devra éventuellement leur ajouter ou leur substituer.

ARTICLE III

LE PROBLÈME SCIENTIFIQUE DU DISCERNEMENT DES MOUVEMENTS RÉELS

23. Connaissance empirique et recherche scientifique. — Les hommes, dans l'interprétation qu'ils font couramment des données sensibles, interprétation qui les conduit très vite, après avoir amplifié et lié les apports fragmentaires des sens, à classer les êtres d'après leurs propriétés caractéristiques, à reconnaître entre eux les rapports constants les plus manifestes, parfois même à rendre compte de ces propriétés et de ces rapports au moyen d'explications plus ou moins profondes, obéissent déjà aux principes suprêmes de toute science. Ces principes, qui se résument dans celui d'*intelligibilité*, nous poussent à ordonner toutes choses en un système assez cohérent et assez simple d'une part pour que — l'ayant construit — nous puissions le comprendre ; assez conforme d'autre part aux données positives, assez apte à les accueillir en lui-même, pour que nous y puissions voir une image abrégée et pas trop infidèle de l'ordre du monde. Du reste les procédés employés d'instinct dans l'interprétation la plus vulgaire des faits bruts sont déjà eux aussi conformes aux méthodes scientifiques de découverte : ils consistent à rechercher l'intelligible sous le sensible, c'est-à-dire l'essentiel sous l'accidentel, la régularité dans l'enchevêtrement des variations apparentes, les analogies ou les identités parmi les différences secondaires ou superficielles ; de plus cette recherche se fait à tâtons : on part de suppositions suggérées par les faits, suppositions dont on déduira des conséquences vérifiables, et que l'on écartera ou modifiera si le contrôle expérimental de ces conséquences éventuelles ne réussit pas,

que l'on gardera du moins comme admissibles dans le cas contraire : à ces traits se reconnaît la méthode inductive de découverte, celle des *hypothèses contrôlées*.

Si nous rappelons en passant cette continuité des principes moteurs et de la méthode dans tous les domaines de la recherche et à tous les degrés du savoir humain, c'est afin de montrer plus aisément comment les problèmes que nous avons étudiés jusqu'ici vont se préciser quand la *science* s'en emparera. Ce mot de science est par lui-même assez indéterminé, car la science, d'une époque à l'autre, se développe, et souvent même évolue. Malgré cela nous pourrions assez facilement, croyons-nous, opposer sur le point qui nous occupe les conceptions scientifiques aux conceptions vulgaires, à condition — pour écarter tout débat prématuré — de considérer la science dans sa forme la plus classique.

Si l'on suit dans le travail scientifique les mêmes principes et les mêmes procédés généraux que dans la pensée courante, on le fait plus consciemment, d'abord. On veut plus nettement et plus exclusivement savoir ce qui est : et l'on est conduit par là-même à se défier davantage des erreurs possibles, des inductions hâtives, des explications fausses ou verbales. On prend donc d'instinct une attitude critique vis-à-vis des principes spéciaux du domaine que l'on étudie — principes que l'on voudra tout au moins recenser et formuler expressément ; vis-à-vis des postulats implicites, que l'on tentera de justifier ou de rendre inutiles ; vis-à-vis des méthodes, dont on éprouvera la rigueur, tant dans l'énoncé des hypothèses et la déduction logique de leurs conséquences, que dans la façon de les contrôler. Puis, pressentant que tout se tient dans les choses, et craignant de s'enfermer dans un horizon trop étroit, on s'imposera des enquêtes aussi amples et aussi profondes que possible, et l'on aura pour idéal la systématisation la plus complète. Ces exigences se préciseront suivant les domaines explorés : c'est ainsi que le monde inorganique se révélant soumis à des lois générales assez simples pour s'exprimer mathématiquement, la *mesure* des grandeurs physiques liées selon ces lois apparaîtra — par la précision qu'elle impose ou permet — à la fois comme une condition d'objectivité et comme une nécessité de méthode. Du reste tout cela ne se déduit pas immédiatement du seul fait qu'on veut faire œuvre scientifique : ce sont les progrès mêmes d'une science qui révèlent peu à peu ses exigences ; et souvent ils consistent

autant à poser clairement de nouveaux problèmes qu'à trouver des solutions. Ajoutons que pour mener à bien l'entreprise la collaboration apparaît vite nécessaire, non seulement entre contemporains, mais encore entre les premiers chercheurs et ceux qui — héritiers parfois lointains de leurs travaux — sont appelés à les prolonger ; et qu'enfin l'entr'aide s'étend d'une branche à l'autre du savoir, les sciences diverses étant partiellement solidaires dans leurs principes, et — quand elles ont pour objet le réel — devant concourir harmonieusement à la même synthèse.

En conséquence, on ne saurait s'étonner que poussée par ce désir d'objectivité, usant de cette rigueur de méthode, profitant de cette richesse d'information, la science non seulement arrive à prolonger très loin, mais parfois ait à modifier profondément les idées que les hommes s'étaient faites d'abord sur l'organisation du monde.

24. La science confirmera quant à l'essentiel l'interprétation vulgaire des mouvements terrestres. — Appliquant à notre sujet ces remarques générales, demandons-nous comment l'esprit scientifique pourra se manifester dans l'interprétation des mouvements perçus. Si certaines idées comme celle de la réalité du monde tangible s'opposant aux apparences visuelles doivent paraître assez solidement établies par leur universelle vérification pour être adoptées telles quelles, par contre d'autres intuitions, trop vagues, du sens commun, comme l'idée que toutes les forces agissent de la même façon, ou des postulats, comme l'immobilité de la Terre, appelleront un examen critique. Les mouvements des astres, au lieu d'être observés dans un but utilitaire ou par des moyens empiriques, deviendront l'objet de recherches directes et suivies, car le physicien ne pourra pas s'en désintéresser. La nature purement quantitative du mouvement et de tous ses éléments — durées, longueurs, vitesses, masses, etc... — ne manquera pas d'imposer à la mécanique réelle la précision de la mesure et celle des lois mathématiques. La nécessité d'observations réparties sur de longues périodes, dans le domaine de l'Astronomie, y rendra plus nécessaire encore qu'ailleurs la collaboration des écoles et des siècles. Enfin, l'étroite implication des notions abstraites de temps, d'espace, de mouvement, de force, se traduira comme nous

l'avons dit tout au début par une certaine solidarité dans le développement des sciences correspondantes.

Si tels sont les principes et les procédés, quels seront les résultats de ce travail méthodique et critique ? Aboutira-t-il à confirmer malgré tout les conceptions vulgaires pour ne faire que les prolonger ? Ou va-t-il au contraire nous obliger à une révision totale de nos idées premières sur les mouvements réels ? La réponse ne tient pas en deux mots : il y aura des divergences — et nous dirons plus loin lesquelles. Mais tout ne sera pas bouleversé, heureusement, et nous pouvons indiquer dès maintenant sur quel point les deux conceptions sont demeurées d'accord.

Nous avons déjà signalé que la science oppose comme le sens commun le monde du toucher au monde de la vue. Elle fait sienne la distinction entre les *apparences* visuelles, variables suivant le point de vue, et les *réalités* tactiles qui se révèlent autrement objectives. Elle n'utilisera donc dans sa reconstruction des choses que les corps tangibles et leurs mouvements dans l'espace tangible. Les mouvements apparents visuels n'y entreront pas comme tels, ou ils devront avoir été au préalable traduits dans la langue du toucher. Ils n'auront donc plus d'intérêt que comme indices de mouvements tangibles que l'on ne saurait percevoir autrement que par les yeux.

Il est vrai que toute l'Astronomie devra se contenter de ces signes apparents ; que toute une science, l'Optique, aura pour objet l'étude précise du monde de la vue, et qu'elle devra corriger quelque peu la façon dont le sens commun traduisait les données visibles en réalités tangibles. Du reste dans deux chapitres sur la Lumière, dont on verra la nécessité, nous traiterons de ces problèmes.

Cependant la mécanique terrestre pourra s'affranchir aisément des apparences visuelles, ou du moins des difficultés de leur interprétation précise : en effet ou bien elle considérera les mouvements de corps accessibles au toucher, et dont elle puisse mesurer d'une façon directe les éléments, le rôle des yeux étant réduit au minimum dans ces mesures, et tel qu'aucune erreur appréciable par rapport aux données tangibles n'en résulte ; ou bien elle considérera des mouvements que la vue seule révèle, mais alors n'ayant qu'à savoir s'ils existent, sans plus, il lui suffira d'interpréter les apparences selon les inductions maintes fois éprouvées du sens commun. Par ce double moyen toutefois, elle ne connaîtra encore que des

mouvements relatifs, qu'il lui faudra répartir entre les corps observés. Nous avons dit quelles inductions variées guident le sens commun dans cette répartition : la science les admettra à peu près toutes. Pour elle aussi un mouvement sera *réel* quand on pourra assigner la force qui l'a produit ou qui l'entretient, ou quand des effets secondaires de la cause productrice se manifesteront, ou quand on constatera telle ou telle conséquence du mouvement lui-même ⁽¹⁾. Le premier de ces critères quand on peut l'employer est le plus sûr ; l'effort d'un être animé, l'impulsion communiquée par une masse elle-même en mouvement sont des forces manifestes, et pour la physique il y en aura bien d'autres. Aussi dès que de telles forces seront assignables, verrons-nous les physiciens attribuer aux corps qui leur sont soumis et qui ne sont pas maintenus en place par des résistances antagonistes, des mouvements réels, au sens obvie du mot, par rapport aux points d'appui ou aux sièges de ces forces. Pour la science donc les animaux se mouvront réellement par rapport à la terre, le vent ou les courants des rivières transporteront réellement les feuilles mortes ; la branche d'arbre atteinte par une pierre se déplacera réellement par rapport à cette pierre ; de même se mouvront réellement sur la route les voitures tirées par des chevaux, sur les rails les trains remorqués par des locomotives ; de même encore dans le boîtier d'une montre les rouages entraînés par la détente d'un ressort, comme par rapport au bâti les engrenages d'un moteur. Aucune théorie n'a jusqu'ici mis en doute de telles attributions de mouvements réels, et vraisemblablement ne le fera jamais. C'est dire combien facilement, dans ce domaine qui n'est autre que celui des mouvements terrestres, les conceptions scientifiques se raccorderont aux idées vulgaires. Plus précises que celles-ci dans la mesure des mouvements, dans la détermination des forces, des masses ou des liaisons, et surtout dans l'explication des mouvements en fonction de toutes ces données, elles substitueront aux notions assez vagues du sens commun les concepts clairs et les lois précises de la cinématique et de la dynamique ; mais elles n'auront pas en général à répartir

(1) Nous devons préciser plus tard cette notion de mouvement *réel* ; cependant les précisions nécessaires relevant d'une science mécanique achevée, et par ailleurs ne devant rien enlever d'essentiel à la notion dans son sens obvie, nous l'emploierons telle quelle dans toute cette partie de notre étude qui précèdera l'exposé de la mécanique de Newton.

d'une façon nouvelle les mouvements réels des corps à la surface de la Terre, ce qui est l'important à notre point de vue.

25. La science devra remettre en question les postulats du sens commun concernant les mouvements des astres. — Nous serons loin cependant d'avoir ainsi résolu toutes les difficultés ; que faudra-t-il penser d'abord des mouvements dont aucune force manifeste n'explique l'existence, des mouvements de pesanteur par exemple ? Pour tout le monde, les corps tombent vers la terre ; mais dans cette constatation d'un fait universel la science ne verra qu'un problème à résoudre et le sens commun ne lui suggère ici aucun principe véritable de solution. La Mécanique terrestre devra donc sur ce point déjà compléter les conceptions communes, et peut-être par des apports totalement nouveaux. Que dire ensuite des mouvements célestes ? Quand nous avons décrit l'interprétation courante des déplacements observés, nous avons eu soin de limiter strictement notre objet : les apparences dues au mouvement de l'observateur étaient facilement démasquées, et sans crainte d'erreur, quand le domaine en cause pouvait être exploré par le toucher ou du moins reconstruit selon les enseignements de l'expérience obvie. Tant qu'il s'agissait d'objets terrestres, on savait en général s'ils peuvent ou non se mouvoir dans telles conditions, ou si l'on était emporté avec eux dans quelque mouvement réel : aucune illusion durable à ce sujet n'était possible, par exemple, dans le cas d'un train et des arbres d'un paysage. Mais qu'il s'agisse de débrouiller les mouvements de corps perceptibles seulement par la vue et dont au surplus on ne sache rien préjuger de façon certaine d'après les données de l'expérience vulgaire, les raisonnements employés couramment pour discerner les mouvements apparents et les mouvements réels, perdront de leur force ou ne s'appliqueront plus que grâce à des postulats sans certitude. Or c'est précisément le cas du mouvement des astres. Supposer que la Terre est immobile est un de ces postulats ; supposer que le Soleil, la Lune ou les étoiles peuvent facilement tourner autour de la Terre en est un autre. L'esprit scientifique pourra les conserver tous les deux pendant des siècles ; il ne le fera pas sans hésitation, ou du moins sans essayer d'apporter des raisons en leur faveur, et il finira par les abandonner. Or c'est ici le point précis où pourront diverger au maximum les idées de tout le monde et les théories de

la science ; et c'est à ce propos que va se poser dans toute son ampleur la véritable question du discernement des mouvements réels et de l'existence d'un système de référence absolu.

26. Insuffisance de la solution fondée sur le postulat géocentrique. — Si notre globe, selon une supposition d'Henri Poincaré ⁽¹⁾, était entouré de nuages perpétuels qui nous cachent absolument le ciel et les astres, et si nous n'avions à considérer d'autres mouvements que ceux qui sont produits à la surface de la Terre par des forces proprement dites, nous saurions toujours, du moins en principe, dire de deux corps dont la distance varie lequel se meut réellement et par rapport à quoi. Tous les mouvements réels paraîtraient se faire soit relativement à la Terre servant de point d'appui immédiat, soit relativement à des systèmes entraîneurs mobiles eux-mêmes par rapport à la Terre. Ils se rapporteraient donc tous, en définitive, au globe terrestre, système de référence universel qu'on pourrait croire absolument fixe. Il semble que dans ces conditions aucune difficulté ne subsisterait dans l'interprétation des données sensibles, et que sachant discerner les mouvements réels, les expliquer par leurs causes, les rapporter au point d'appui qui a permis de les produire, on ait tout dit à leur sujet. Ce serait vrai, peut-être, à supposer qu'on s'en tienne aux phénomènes les plus fréquents et les plus manifestes : pourtant, à considérer dans le détail tous les faits mécaniques à la surface de la Terre, on y découvrirait — nous aurons à le rappeler — certaines anomalies qui, rapprochées d'anomalies analogues observées sur des corps terrestres en mouvement, jetteraient un doute déjà sur la fixité de notre globe. Mais il y a plus : la vue des hommes porte en fait jusqu'aux astres, et ce sont des considérations astronomiques qui, avant tout, les ont obligés de réviser le postulat que la Terre est immobile, ou si l'on veut le *postulat géocentrique* ⁽²⁾. On conçoit que cette révision rouvre la question du discernement des mouvements réels. Si en effet la Terre se meut par rapport aux astres, elle cesse d'abord de constituer un point de vue privilégié pour la description des mouvements célestes,

⁽¹⁾ H. Poincaré : *La Science et l'Hypothèse*, Paris, 1902, chap. VII. *Le mouvement relatif et le mouvement absolu*, p. 138.

⁽²⁾ Le nom hybride *géofixisme* serait plus clair et plus exact que celui de géocentrisme : nous l'emploierons le cas échéant.

et toutes nos combinaisons cinématiques de ces mouvements peuvent s'en trouver modifiées ; d'autre part, elle devient pour tous les mobiles qu'elle porte un simple système entraîneur ; et alors trouvera-t-on parmi les astres ou en dehors d'eux un autre système qui puisse jouer à son tour le rôle de repère universel ?

A priori la réponse est douteuse : nous ne disposons plus des mêmes principes de solution que pour les mouvements terrestres. Allons-nous appliquer de but en blanc à des masses telles que la Terre, le Soleil ou les étoiles des forces capables de les mouvoir ? S'il y a de telles forces, sont-elles soumises aux mêmes lois que nous observons sur la Terre ? Ont-elles besoin de points d'appui matériels ? Puis, les astres qui se meuvent peuvent-ils s'entraîner dans leur mouvement ou n'ont-ils qu'un mouvement propre chacun ? S'ils peuvent constituer des systèmes entraîneurs, y a-t-il ou non une hiérarchie de ces systèmes, et trouvera-t-on, ou pourra-t-on concevoir un système fondamental qui servirait de repère en fin de compte à tous les mouvements de l'Univers ? Autant de questions, autant d'énigmes, tant du moins qu'on ne s'est pas astreint à les étudier méthodiquement et en s'aidant de toutes les lumières de l'observation et du raisonnement.

27. Les solutions pourront différer non seulement par le choix du système de référence universel, mais encore par la façon d'expliquer les mouvements célestes. — Essayons cependant d'énumérer les principales solutions concevables : ce sera pour nous le moyen de poser enfin dans ses véritables termes notre problème central.

Ne considérant d'abord que les astres eux-mêmes, on pourra trouver des raisons d'attribuer à l'un d'eux, la Terre ou un autre, une fixité « *absolue* », entendant par là, comme nous l'expliquerons mieux plus loin, qu'on n'aurait aucune raison positive de lui attribuer un mouvement réel quelconque. Cet astre privilégié sera le repère naturel, immédiat ou non, des mouvements de tous les autres, et il jouera dans l'Univers le même rôle que le globe dans notre monde terrestre. On aurait alors ce qu'on pourrait appeler un fixisme astronomique.

Ou bien à l'opposé on reconnaîtra qu'aucun astre ne joue un rôle privilégié, de sorte que pour l'étude des mouvements célestes on pourra se référer à tel astre aussi bien qu'à tel autre. Ce serait

alors le triomphe du relativisme tel que l'ont conçu certains physiciens modernes, en particulier Mach et Einstein.

Considérons maintenant à côté des astres eux-mêmes le milieu dans lequel ils se meuvent, et auquel on pourrait attribuer une sorte d'existence autonome sous le nom d'espace, ou comme on le fera aussi sous le nom d'éther. Nous avons ici semble-t-il plus de ressources : même si aucun astre ne joue un rôle privilégié, tous du moins se meuvent dans le milieu universel, qui peut être considéré comme absolument fixe, et nous pouvons, par là, échapper au relativisme. Il en serait de même dans l'hypothèse où les mouvements observables des astres ou des systèmes d'astres, au lieu de se définir simplement par rapport à certains de ces corps matériels, devraient être rapportés à des points de l'espace non liés à de la matière. Mais il est à prévoir que ce recours à l'espace vide ou à un milieu qui le remplisse n'irait pas sans soulever plus d'une objection d'ordre philosophique, sinon proprement scientifique.

Du reste, le choix de tel système de référence absolu pour l'ensemble des mouvements observables n'est pas par lui-même une solution complète du problème, car plusieurs interprétations des apparences peuvent *a priori* s'accorder avec l'usage d'un même système fondamental, interprétations qui dépendront de l'idée qu'on se fera des mouvements réels et de leur explication. En particulier on pourra au sujet des mouvements célestes, rapportés par exemple à la Terre, ou bien n'admettre comme réels que ceux qui répondront à telle formule simple — parce qu'on les jugera *naturels* et immédiatement produits — et par suite vouloir dissocier les mouvements complexes des astres visibles en de tels mouvements simples, attribuables bien entendu, les uns aux astres, les autres à des mobiles différents des astres ; ou bien, à l'opposé, on regardera comme réels les mouvements complexes, qu'on expliquera d'autre manière, et l'on déclarera purement fictive la dissociation qu'on en peut faire du point de vue cinématique — d'où des divergences secondaires en un sens mais profondes encore, dans l'interprétation des mouvements observés.

ARTICLE IV

RECOURS NÉCESSAIRE A L'ASTRONOMIE

28. Au point de vue scientifique la question relève de l'Astronomie et des sciences connexes. — Le problème on le voit est d'une extrême complexité, et les solutions possibles sont *a priori* nombreuses. Quelle science va se charger de nous apporter la lumière ? L'Astronomie avant toute autre, c'est certain ; mais pas elle seule. Tant qu'elle ne fait que débrouiller les apparences, que mettre de l'ordre dans les mouvements observés en choisissant et en subordonnant les systèmes de référence, elle jouit d'une certaine autonomie. Pourtant là déjà elle dépend tant soit peu de l'Optique, dans son travail d'observation et, dans son travail d'organisation rationnelle, de la Cinématique. Mais si, voulant *expliquer* les mouvements décrits, elle tente des rapprochements entre la mécanique céleste et la mécanique terrestre, ou si elle veut examiner à fond ses méthodes d'observation elles-mêmes, elle ne peut plus se passer de la Mécanique, ni des lois les plus minutieuses de l'Optique. La solidarité de ces trois sciences du réel s'avère si étroite dans ce domaine que nous ne pourrions discuter à fond le problème de la réalité des mouvements, posé cependant sur le terrain purement astronomique — on vient de le voir —, sans rappeler les principes de la Dynamique, et ceux de la Théorie de la Lumière. N'a-t-on pas vu récemment une expérience d'Optique, celle de Michelson, provoquer une révision de la Mécanique, puis des lois astronomiques elles-mêmes ? Si tout se tient de cette façon, aucune réponse partielle à notre problème ne sera satisfaisante ; seule une théorie assez ample pour embrasser et pour mettre d'accord au moins négativement la mécanique ordinaire, la mécanique céleste et l'optique pourra se présenter comme une solution ; et les critères de sa valeur seront ceux qui conviennent aux conceptions d'ensemble, à savoir la cohérence interne, l'accord avec tous les faits et avec toutes les théories partielles éprouvées, et, devons-nous ajouter, l'aptitude à s'exprimer à l'aide des concepts fondamentaux les plus intelligibles de la pensée humaine. On ne sera donc pas surpris si pour nous faire une opinion motivée sur le

problème des mouvements réels, une longue et minutieuse enquête préalable d'ordre scientifique avant tout nous a paru nécessaire, et si dans notre exposé nous allons insister non seulement sur les idées maîtresses des diverses théories proposées, mais encore, puisqu'il s'agit de leur valeur, sur la réussite de chacune dans l'interprétation de tous les phénomènes observables.

29. Précarité de toute solution philosophique a priori. — Plusieurs, il est vrai, pourraient demeurer sceptiques sur la nécessité d'une telle enquête. De quoi s'agit-il ? vont-ils demander. Dans une étude de philosophie, de philosophie des sciences tout au plus, on ne peut entrer dans le détail des théories, ni faire intervenir l'appareil mathématique : on doit se borner à l'essentiel du sujet. Ne serait-il donc pas possible, par des raisonnements *a priori* sur les notions de Mouvement, d'Espace ou de Temps, de résoudre la question de la réalité de certains mouvements dans la mesure où la Philosophie peut et doit la résoudre ?

Mais nous demanderons à notre tour ce qu'on espère tirer d'un tel procédé. Va-t-on dire par exemple que, tout mouvement réel devant se faire relativement à un corps réel immobile, cela seul exclut toute relativité de droit, même si l'on est incapable de dire dans tous les cas quel est ce corps ? Alors nous rappellerons que ce principe, après avoir été dogmatiquement énoncé par Aristote, a dû bientôt céder à la pression des faits. Va-t-on à l'opposé, prétendre que, le mouvement étant une relation, il faut prendre son parti de sa relativité radicale et ne rien chercher de plus ? Ce serait laisser sans explication le fait qu'on sait dépasser dans plus d'un cas ce point de vue paresseux et découvrir des systèmes de références privilégiés. Ou bien dira-t-on que tout mouvement relatif observé est à coup sûr l'indice de quelque mouvement « absolu », et que c'est assez de cette certitude ? Nous craindrions alors que l'expression de mouvement absolu n'ait aucun sens précis, et le principe formulé pas davantage. Bref, nous croyons que de tels raccourcis manquent de sécurité quand ils aboutissent à des thèses affirmatives, ou s'ils sont sûrs ne mènent à rien de nouveau. Ici, comme dans toutes les questions dont les sciences se sont occupées, la Philosophie n'a aucun intérêt à vouloir se suffire : son rôle est bien plutôt, si elle ne veut pas se condamner à produire des affirmations téméraires ou des thèses sans grande portée, d'essayer

de pénétrer la pensée des spécialistes afin d'en extraire l'essentiel et d'en apprécier la valeur de vérité, puis, à la lumière de leurs enseignements, de s'efforcer de résoudre, s'il se peut, du point de vue total de la métaphysique, les problèmes que la science lui a permis de poser en termes précis. En tous cas, nous n'avons pas conçu d'autre façon cet essai critique sur le discernement des mouvements réels.

30. Le présent travail est une étude de « Philosophie scientifique ». — Nous connaissons maintenant le problème à résoudre et la direction dans laquelle il faut chercher la solution. Nous n'avons plus pour compléter ces indications qu'à préciser davantage l'objet de notre travail, c'est-à-dire l'angle sous lequel nous allons envisager la question de la réalité et du repérage des mouvements, puis à indiquer en conséquence quelle sera notre méthode d'information et de critique.

Nous nous adressons principalement à ceux qui s'intéressent à la Philosophie des sciences, ou plutôt aux sciences dans leurs rapports avec la Philosophie. C'est reconnaître d'abord que nous n'avons pas la prétention d'apprendre quoi que ce soit aux Astronomes ou aux Physiciens dans leur domaine propre. C'est laisser entendre aussi que nous nous placerons à un point de vue qui soit accessible aux Philosophes, tant par les questions abordées que par la façon d'en parler. Plusieurs fois au sujet des théories d'Einstein on a exprimé le souhait que les principes de ces théories soient énoncés autant que possible en langage ordinaire et leurs conséquences déduites ou du moins exprimées sans trop de formules mathématiques. Nous n'avons pas cru que ce fût là chose impossible ni pour les théories relativistes, dont nous parlons ailleurs, ni surtout pour les théories de Newton et de Fresnel, qui seront les pièces maîtresses du présent travail ; et peut-être notre effort répondra-t-il d'une certaine manière à ces désirs.

Mais, si l'on peut se mettre au point de vue du philosophe, à savoir celui d'où se découvrent les thèses essentielles d'une doctrine, si l'on peut aussi respecter ses habitudes de pensée, qui excluent le formalisme mathématique en tant que tel, on ne saurait guère, croyons-nous, aller plus loin dans cette voie. Il n'y a pas, nous l'avons rappelé, dans les domaines communs, deux vérités, une pour la science, une autre pour la philosophie : et nous devons nécessai-

rement employer dans notre exposé sinon toutes les formules techniques des Astronomes ou des Physiciens, du moins leurs notions et leurs formules fondamentales ; nous devons envisager comme eux les questions ; bref, essayer de faire comprendre les principes, les méthodes et les résultats capitaux de leurs recherches en ce qui touche à notre sujet ; — aussi bien avons-nous dû nous mettre nous-même à leur école, autant que nous l'avons pu. Toutefois, redisons-le, ce ne sera là pour nous qu'un travail préparatoire : après nous être renseigné de notre mieux sur les données positives relatives à notre problème, nous essayerons de le formuler puis de le résoudre d'un point de vue plus ample que celui des savants, et qu'on peut qualifier de philosophique. On verra au moment voulu comment nous l'entendons.

31. Part faite à l'histoire. — Tels furent notre dessein précis et nos procédés d'information. Il nous reste à donner quelques indications propres à justifier le plan de notre étude. Deux façons de la conduire s'offraient à nous. D'abord nous pouvions envisager notre problème sous son seul aspect *actuel*, abstraction faite de toute considération historique. Nous nous serions borné par exemple à exposer les théories de la Relativité — puisqu'elles représentent l'état le plus récent de la Mécanique — ; et nous aurions cherché à les apprécier soit en elles-mêmes, comme simple expression de l'expérience, soit par rapport aux exigences de l'esprit en quête d'intelligibilité. A vrai dire le premier objet de notre travail fut celui-là : nous désirions connaître la conception relativiste et nous faire une opinion sur sa portée philosophique. Mais précisément en cherchant à pénétrer cette doctrine nouvelle, nous nous aperçûmes bientôt qu'il était indispensable, pour aboutir, de procéder par comparaison, et qu'une étude approfondie des doctrines classiques de Newton pour la mécanique et de Fresnel puis de Maxwell pour l'optique pouvait seule nous préparer à comprendre les théories de la relativité. C'est ce qui nous donna l'idée de traiter notre sujet d'une autre façon, où *l'histoire* aurait sa place, même l'histoire des conceptions aujourd'hui périmées ; et nous nous décidâmes pour cette seconde manière.

Est-ce à dire que nous allons faire un exposé historique complet de la question ? Non pas. L'histoire demeurera pour nous un moyen ; nous n'y ferons appel que dans la mesure où elle révèle

les grandes étapes qui ont conduit les hommes à ce que nous regardons comme la vérité, et où elle peut éclairer les solutions présentes et faciliter leur examen critique ; en d'autres termes, nous nous bornerons à l'histoire des acquisitions et des progrès, laissant délibérément de côté, tout intéressante qu'elle puisse être, celle des piétinements, des reculs, ou des controverses stériles.

D'ailleurs, dans l'ensemble des doctrines astronomiques et mécaniques nous ferons à dessein aux théories classiques de Newton et de Fresnel une place privilégiée ; et ceci pour deux raisons : du point de vue dogmatique, d'abord, nous sommes convaincu — et c'est proprement notre thèse — que, réserve faite touchant les théories relativistes, la véritable réponse au problème des mouvements réels et de leur discernement peut et doit être rattachée à l'existence d'un système de référence absolu, comme l'admettaient — à leur façon — Newton et Fresnel ; ensuite, du point de vue de l'histoire, les théories dites classiques se présentent à nous comme occupant une position centrale, en ce sens que sans elles on ne saurait comprendre les théories récentes des relativistes, tandis qu'elles-mêmes, au contraire, peuvent être comprises sans qu'on se réfère aux théories plus anciennes.

Nous ne laisserons cependant pas tout à fait de côté les conceptions astronomiques des Anciens : elles font le pont, pour ainsi dire, entre cette conception courante de l'Univers que nous avons d'abord décrite et les reconstructions plus achevées de la Science moderne ; et puis un minimum d'histoire nous sera grandement utile non seulement pour nous rendre compte de la genèse des idées classiques, mais encore pour mieux comprendre et mieux apprécier ces idées en elles-mêmes. Toutefois nous nous bornerons aux très grandes lignes de l'évolution des anciennes astronomies — qui toutes admettaient la fixité de quelque corps matériel dans le monde, et avaient ainsi un repère absolu tout trouvé —, pour souligner ensuite l'idée que sur ce point leur opposent les conceptions modernes, à savoir l'universelle mobilité des masses matérielles de l'Univers. Il est clair que cette opposition est capitale en ce qui concerne notre problème : car si les modernes veulent conserver la notion d'un système de référence absolu pour tous les mouvements, ils doivent le concevoir d'une tout autre façon que les Anciens.

Notre objectif principal fut précisément d'établir le bien-fondé

d'une solution absolutiste du problème des mouvements réels — solution nouvelle en un sens, mais que nous croyons conforme à l'esprit sinon à la lettre de la science classique. Notre confiance dans la valeur de la thèse absolutiste devait naturellement nous faire adopter à l'égard des théories relativistes — qui tendent à nier l'existence de tout système privilégié — une attitude critique. C'est la raison pour laquelle, en dépit d'une continuité didactique évidente, nous avons pu séparer, même matériellement, de la présente étude d'inspiration classique sur *le système absolu et les mouvements réels*, notre travail sur *les systèmes privilégiés de la physique relativiste*.

Ces quelques explications aideront sans doute le lecteur à mieux comprendre l'ordre des chapitres que nous avons annoncés dans l'Avant-propos.

Achevons maintenant nos préliminaires par un article sur les *apparences célestes* ; ce ne sera point inutile pour préparer l'exposé de conceptions qui relèvent principalement de l'Astronomie.

ARTICLE V

LES APPARENCES CÉLESTES FONDAMENTALES

32. Mouvements de révolution et mouvements de rotation. —

Il est indispensable, pour saisir les problèmes qui se sont posés aux Astronomes de tous les temps, de connaître l'aspect sous lequel le « Ciel », c'est-à-dire l'ensemble des astres, se présente à nous quand nous l'observons d'un point quelconque de la surface de la Terre. Mais pour bien comprendre ces données d'Astronomie « descriptive », il faut savoir en quoi consistent certains mouvements types, en particulier ceux de *révolution* et ceux de *rotation*. Nous n'en avons pas parlé plus tôt parce que ce n'était pas utile pour étudier les perceptions de mouvement et leur interprétation courante ; le moment est venu d'en dire quelques mots.

a) Considérons d'abord, dans un plan, un point fixe, O, et un autre point, M, qui décrit une circonférence ayant pour centre le point fixe (fig. 2). M a un mouvement de *révolution* autour de O. La distance des 2 points demeurant invariable, il est évident

que le mouvement de M ne peut se définir par rapport au seul point O. Ce mouvement s'accomplit, avec O pour centre fixe,

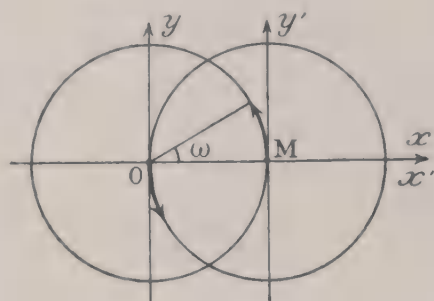


Fig. 2.

relativement à d'autres points du plan, pris pour repères. Le plus simple est de considérer dans le plan 2 axes rectangulaires, Ox et Oy , qui se coupent en O, et qui sont *orientés*, c'est-à-dire sur lesquels on a fixé, par convention, un sens positif et un sens négatif. Alors, on peut rapporter à ces axes les positions de M en

fonction du temps, et déterminer complètement son mouvement de révolution.

Sa *trajectoire* est donc un cercle de centre O, et de rayon OM, distance initiale des 2 points. Pour fixer son sens il faut recourir à 3 points de la trajectoire se suivant dans un ordre donné ; par exemple 3 points qui coupent 3 des demi-axes — et l'on dira, suivant les cas, que le *sens* du mouvement de M va soit des x positifs aux x négatifs en passant par les y positifs, soit au contraire des x positifs aux x négatifs en passant par les y négatifs. La *vitesse* de M a deux aspects : d'abord la longueur parcourue sur la circonférence dans l'unité de temps ; c'est la *vitesse linéaire* v ; ensuite l'angle décrit par le rayon OM dans l'unité de temps ; c'est la *vitesse angulaire*, ω . Bornons-nous au cas d'une vitesse linéaire constante : alors le temps T mis par le mobile pour faire un tour complet s'appelle la *période* de révolution. Si r est le rayon, la circonférence a pour longueur $2\pi r$, et la vitesse v est, en fonction du rayon et de la période $v = \frac{2\pi r}{T}$. La vitesse angulaire est constante aussi, quand la vitesse linéaire est constante ; elle est égale au quotient par la période de 360° , ou de 2π radians, ⁽¹⁾ c'est-à-dire de l'angle décrit pendant un tour : $\omega = \frac{360^\circ}{T}$; ou $\omega = \frac{2\pi}{T}$; d'où $v = \omega r$.

On peut considérer le mouvement d'un point M « autour » d'un

⁽¹⁾ L'arc d'un *radian* a une longueur égale au rayon, d'où la longueur de la circonférence, en radians, est égale à 2π . On exprime aussi en radians les angles au centre correspondant aux arcs.

point fixe O , mais sur une trajectoire qui au lieu d'être une circonférence soit une courbe plane fermée à l'intérieur de laquelle soit le point fixe. Un cas particulier important est celui où la trajectoire est une ellipse dont O est un foyer.

Nous savons que dans le cas d'un mouvement rectiligne d'un point B par rapport à un autre point A , il y a réciprocité en ce sens qu'après avoir considéré A comme fixe, on peut attribuer la fixité à B . Alors A se meut par rapport à B sur la droite AB ; et il a sur cette droite une vitesse égale en valeur absolue à celle qu'avait B , mais de sens contraire.

Il existe aussi une réciprocité dans le mouvement de révolution : regardons notre point M comme fixe, et prenons-le pour origine de nouveaux axes, Mx' et My' , parallèles aux premiers et de même orientation. Par rapport à ces axes, le point O accomplit, autour de M , un mouvement de révolution : il décrit une circonférence de centre M et de rayon MO ; il a sur cette circonférence la même vitesse qu'avait M par rapport à lui, mais ici les sens des 2 mouvements, dans leur plan commun, sont les mêmes.

Soit maintenant une figure plane, un cercle de centre C par exemple, et dans son plan un point extérieur, O . Supposons que la droite OCM , qui joint le point O à un point M de la circonférence et au centre C , tourne autour de O d'un mouvement uniforme, chacun de ses

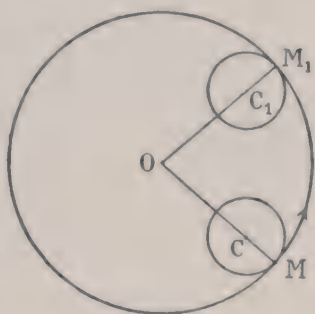


Fig. 3.

points décrivant un cercle de centre O : le cercle tout entier a autour de O un mouvement de révolution (fig. 3).

b) Un corps solide, c'est-à-dire un ensemble de points dont les distances mutuelles sont invariables, est en *rotation* autour d'un axe qui le traverse, et par rapport à un système de référence extérieur, quand chacun de ses points — sauf ceux qui coïncident avec l'axe — décrit, dans le plan perpendiculaire à l'axe mené par le point considéré, une circonférence ayant son centre sur l'axe. Tous les points du solide ont donc, autour de quelque point de l'axe, des mouvements de révolution ; ces mouvements sont tous de même sens et ont même vitesse angulaire ; mais les vitesses linéaires des différents points sont proportionnelles aux circonférences qu'ils décrivent, donc à leurs rayons, ou à leurs distances

à l'axe. Le mouvement d'une roue de machine autour de son axe et par rapport au bâti représente une rotation, à condition d'entendre par axe de rotation l'axe *géométrique* du cylindre qui sert effectivement d'appui à la roue.

Si la rotation est constante, il y a encore une période T et l'on a toujours pour la vitesse angulaire $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{360^\circ}{T}$, et pour la vitesse linéaire d'un point dont la distance à l'axe est r , $v = \frac{2\pi r}{T} = \omega r$. Ainsi la vitesse angulaire de l'aiguille des minutes d'une horloge est $\frac{360^\circ}{60}$, ou 6° par minute, la période étant de 1 heure, ou 60 minutes.

Nous avons défini la rotation du solide par rapport à un système extérieur : de fait, la seule considération de l'axe et du solide ne suffirait pas à définir le mouvement de rotation, puisque tous les points du solide restent à des distances invariables de l'axe. Le système de référence sera ici un trièdre, constitué par 3 axes orientés, rectangulaires 2 à 2, ox , oy et oz . Supposons que l'axe de rotation coïncide avec oz . Le sens de rotation se définira par exemple en disant qu'un point M du solide situé dans le plan oxy , va des x positifs aux x négatifs en passant par les y positifs.

Une autre façon de déterminer le sens d'une rotation consiste à imaginer un observateur placé le long de l'axe : son orientation sur l'axe — la tête vers telle extrémité et les pieds vers l'autre extrémité opposée — et le fait qu'il a une gauche et une droite, permettent de définir conventionnellement par rapport à lui le sens du mouvement. En mécanique, on appelle rotation de sens *positif* celle qui conduit un point du solide de la gauche de l'observateur vers sa droite en passant devant lui ; l'observateur ayant sa tête du côté positif de l'axe de rotation. En astronomie, on appelle rotation de sens *direct* celle qui conduit un point du solide de la droite vers la gauche de l'observateur, en passant devant lui, l'observateur ayant sa tête du côté *nord* de l'axe de rotation ; un mouvement de sens contraire à ceux-là est dit en mécanique *négatif*, en astronomie *rétrograde*. On voit que l'orientation de l'observateur sur l'axe de rotation équivaut à l'orientation des 3 axes du trièdre. Les conventions concernant le sens des rotations peuvent s'appliquer d'ailleurs aux mouvements de révolution des points isolés à condition de concevoir un axe orienté perpendiculaire au plan de révolution et passant par le centre fixe.

Quand un solide tourne autour d'un axe par rapport à un ensemble de points extérieurs, on peut considérer comme fixe le solide ; alors, par rapport à lui, les points extérieurs tournent en bloc autour de l'axe de rotation du solide, avec la même vitesse angulaire qu'avait celui-ci, *mais en sens contraire*. Notons qu'on peut ici définir le mouvement corrélatif par rapport au solide supposé fixe, parce que ce solide ayant 3 dimensions peut servir de trièdre de référence.

Cette réciprocité est surtout intéressante dans le cas de 2 corps de révolution, par exemple d'un cylindre creux entourant un cylindre plein de même axe, les deux tournant l'un par rapport à l'autre autour de l'axe commun (fig. 4) ; et dans le

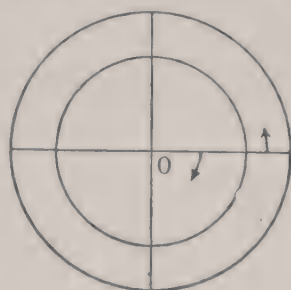


Fig. 4.

cas d'une sphère creuse enveloppant une sphère pleine de même centre, les 2 tournant l'une par rapport à l'autre autour d'un même diamètre.

c) Supposons qu'un solide se déplace par rapport au trièdre de référence de telle façon que les segments qui joignent ses points 2 à 2 restent tous parallèles pendant le mouvement à leur direction primitive. Ce solide est en *translation*. Tous ses points décrivent alors, simultanément, des trajectoires superposables ; si elles sont rectilignes, la translation est rectiligne ; si elles sont circulaires, la translation est circulaire. On a un exemple approché d'une translation circulaire dans le mouvement d'un homme qui marcherait autour d'une table ronde mais en restant toujours tourné vers une même paroi de la salle.

On peut avoir à considérer la translation circulaire d'un corps dont les dimensions soient négligeables relativement aux éléments de la trajectoire ; alors le mobile peut être assimilé à un point, et sa translation à une *révolution* de ce point, autour du centre de la translation circulaire et par rapport aux axes de référence. C'est en ce sens qu'on parle de la « révolution » des Planètes autour du Soleil ou de la Lune autour de la Terre, tous ces astres étant assimilés à des points.

Nous allons maintenant utiliser ces quelques définitions pour décrire les principales apparences célestes.

33. Mouvements de la Terre et des astres errants par rapport aux étoiles, d'après Copernic. — Toute description du mouvement des astres suppose le choix d'un système de référence concret. Or les mouvements célestes les plus manifestes se présentent sous un aspect particulièrement simple si l'on admet, avec Copernic, que l'ensemble des étoiles est fixe ; que par rapport aux étoiles le Soleil est immobile ; que les Planètes, y compris la Terre, circulent autour du Soleil dans le sens *direct*, c'est-à-dire, pour un observateur supposé debout au pôle Nord, de sa droite vers sa

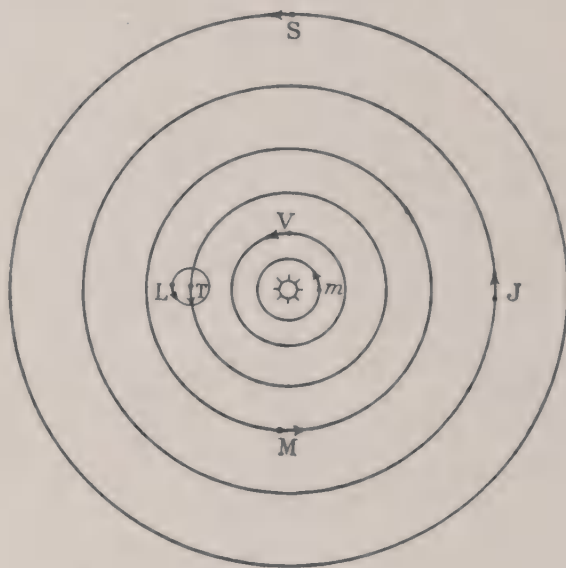


Fig. 5.

gauche en passant devant lui, donc de l'ouest à l'est, ou d'Occident en Orient, et dans des plans assez voisins les uns des autres ; — (nous admettrons que ces plans sont de directions invariables par rapport aux Etoiles, ce qui n'est vrai pour la Terre qu'à 1° près environ) — ; qu'en plus de cela, la Terre tourne en un jour dans le sens direct encore autour de la ligne de ses pôles, mais que cette ligne décrit, en une période très longue, un cône par rapport aux étoiles ; et qu'enfin la Lune, tout en suivant la Terre dans sa révolution autour du Soleil, circule autour d'elle dans un plan peu incliné sur celui de l'orbite terrestre, et toujours dans le sens direct (fig. 5).

Mais les Anciens, jusqu'à Copernic, n'admirent pas que la Terre fût mobile : ils la crurent absolument fixe et rapportèrent à elle tous les mouvements célestes ; et nous devons, pour com-

prendre leurs conceptions astronomiques, nous représenter les mouvements des astres comme ils le faisaient eux-mêmes. Nous y arriverons si nous savons passer des mouvements selon Copernic aux mouvements apparents relatifs à la Terre supposée fixe ; mouvements apparents qui évidemment résulteront des mouvements des astres selon Copernic et de la contre-partie des mouvements réels de la Terre.

Heureusement certaines circonstances font que ce passage est assez facile et donne des mouvements résultants relativement simples encore.

34. Mouvement diurne apparent de l'ensemble des astres. —

Précisons d'abord les mouvements de la Terre : nous ferons abstraction pour commencer du mouvement lent de l'axe terrestre, qui n'est sensible qu'au cours d'une longue période d'années. Notre globe tourne autour de la ligne de ses pôles et par rapport aux étoiles en un jour ; chacune de ces rotations diurnes est uniforme ; et de plus les rotations successives sont toutes égales : leur durée commune — c'est-à-dire le jour sidéral — est l'intervalle qui sépare deux passages consécutifs d'une même étoile au méridien d'un lieu, plan qui contient l'axe terrestre et la verticale du lieu. Le jour sidéral se divise en 24 heures sidérales, ou en 1.440 minutes, ou en 86.400 secondes sidérales.

Mais, tout en tournant, la Terre, ou plutôt son centre, décrit en un an, avec une vitesse légèrement variable, une ellipse peu aplatie dont le Soleil occupe l'un des foyers. Elle change donc de place au cours d'une année par rapport aux étoiles : ce mouvement de notre observatoire ne va-t-il pas compliquer beaucoup pour nous les apparences ? Nous avons dit que non, et voici pourquoi. D'abord, les dimensions de l'orbite elliptique de la Terre sont si petites par rapport aux distances de la Terre aux étoiles qu'aucune différence sensible ne s'introduit dans la disposition des étoiles les unes par rapport aux autres du fait que nous les observons d'un point quelconque de notre orbite ou du point opposé. Ensuite la direction de l'axe terrestre est, à très peu de chose près, constante, au cours d'un siècle par exemple, par rapport aux étoiles, en sorte que cet axe est transporté parallèlement à lui-même dans le mouvement de translation.

Constance de la vitesse de rotation, constance de la direction de

l'axe, insignifiante relative des déplacements parallèles de cet axe, telles sont les raisons qui, jointes à la constance du plan orbital, empêchent les mouvements apparents de l'ensemble des astres d'être compliqués quand on choisit la Terre comme système absolument fixe.

Pour pouvoir définir ces mouvements apparents nous n'avons qu'à nous rappeler le sens dans lequel la Terre tourne par rapport aux étoiles : c'est le *sens direct*. Dès lors, par contraste, si nous regardons la Terre comme immobile — c'est-à-dire ici comme dépourvue de rotation sur son axe —, les étoiles nous paraîtront tourner en un jour d'un même mouvement d'ensemble, dans le *sens rétrograde*, ou de l'est à l'ouest, ou d'Orient en Occident ; et cela autour d'un axe idéal qui prolonge jusqu'à la « sphère céleste » la ligne des pôles de la Terre, et qu'on appelle l'axe du monde ⁽¹⁾.

Et ce ne sont pas seulement les Etoiles qui paraîtront animées d'un mouvement diurne apparent : tous les astres proches de nous, Lune, Soleil et Planètes, participeront à ce mouvement d'ensemble du ciel ; ce qui ne les empêchera pas d'avoir à nos yeux des *mouvements propres*, que ces mouvements soient réels, — c'est le cas de la Lune — ; qu'ils soient simplement dus à la translation de la Terre, — c'est le cas du Soleil — ; ou enfin qu'ils résultent des deux causes réunies, — c'est le cas des Planètes.

35. Les Etoiles, système de référence pour les mouvements des astres errants. — Il y a des étoiles tout autour de notre Globe. A supposer que la lumière du Soleil diffusée par l'atmosphère ne les rende pas invisibles de jour, de l'Equateur on les verrait défiler toutes successivement au cours d'un jour sidéral ; du pôle Nord on verrait constamment celles de la moitié boréale du Ciel, et jamais celles de la moitié australe, parce qu'elles seraient toujours cachées par le globe terrestre ; du pôle Sud ce serait l'in-

(1) L'axe du monde, joint à l'équateur céleste — c'est-à-dire à un plan qui coïncide avec l'équateur terrestre et se prolonge jusqu'aux étoiles — constitue un système de « coordonnées célestes » ; système rattaché à notre globe, et qui présente l'avantage d'être valable pour tous les observateurs terrestres. De fait, il est nécessaire, pour s'entendre, de supprimer les différences de position des astres qui tiennent à la diversité des points d'observation à la surface de la Terre ; or, il est aisé de passer des positions constatées dans un lieu donné aux positions relatives à ce système universel que nous venons de définir, quand on connaît les coordonnées géographiques du lieu.

verse. D'une position intermédiaire entre l'Equateur et le pôle Nord par exemple, comme Paris, certaines étoiles seraient constamment visibles, — les plus proches de l'étoile polaire qui marque le pôle céleste boréal — ; d'autres toujours invisibles, — les plus proches du pôle céleste austral — ; d'autres enfin apparaîtraient et disparaîtraient tour à tour au cours d'un même jour : au total on en verrait plus que du Pôle, mais moins que de l'Equateur.

En fait toutes les étoiles que pour un lieu donné la masse de la Terre n'éclipse pas constamment ne sont pas visibles en un même jour, à cause du Soleil ; mais elles peuvent être vues toutes au cours d'une année, parce que, du fait du mouvement annuel de la Terre, le Soleil n'éclaire pas toujours le même côté du ciel par rapport à l'observateur du lieu.

Nous avons dit que la Lune, le Soleil et les Planètes participaient au mouvement diurne apparent des étoiles, mais qu'ils avaient en plus des mouvements propres — d'où leur nom d'*astres errants*. Ces mouvements propres étant différents du mouvement diurne se définissent tout naturellement par rapport aux étoiles, qui, elles, n'ont que le mouvement diurne. Il faut donc que les Astronomes puissent repérer les positions des étoiles les unes par rapport aux autres pour faire de leur ensemble, malgré sa rotation apparente, un système de référence pour les mouvements des astres errants. Or, la partie du ciel qui est visible la nuit au cours d'une année, pour nos régions, suffit précisément à jalonner parmi les étoiles la marche de la Lune et des Planètes — qu'on peut voir de nuit — ; et aussi la marche du Soleil — qu'on ne voit pas parmi les étoiles, puisqu'il les éteint par sa lumière, mais dont on peut reporter les positions, observées de jour, sur le ciel stellaire observé la nuit.

Nous pouvons dire maintenant comment se présentent à nos observations les mouvements propres des astres errants.

36. Mouvement propre apparent du Soleil. — Le mouvement diurne du Soleil, dans nos régions, le fait alternativement se lever à l'Orient et se coucher à l'Occident, comme les étoiles qui pour nous ne sont ni toujours visibles ni toujours invisibles : d'où la succession des jours et des nuits.

Outre le mouvement diurne, le Soleil présente à nos yeux un

mouvement propre annuel qui est la contre-partie de la translation de la Terre sur son orbite : c'est-à-dire que ses positions apparentes quand il passe au méridien changent d'un jour à l'autre relativement aux étoiles. Dans ce mouvement il suit une trajectoire apparente dont les points se projettent successivement au cours de l'année sur une série de douze constellations portant des noms d'animaux : les douze signes du Zodiaque. Le plan qui contient cette trajectoire s'appelle l'Ecliptique — parce que les éclipses de Lune et de Soleil se produisent quand la Lune est elle-même dans le voisinage de ce plan, qui n'est autre que le plan de l'orbite terrestre.

Le mouvement apparent du Soleil se fait à la vitesse d'environ 1° par jour, vitesse légèrement variable au cours de l'année. Enfin il est de sens contraire au mouvement d'ensemble du ciel, donc de sens *direct* : cela tient à ce que le mouvement de révolution de la Terre, dont il est la contre-partie, se fait aussi dans le sens direct.

L'Ecliptique est incliné de $23^{\circ}1/2$ environ sur l'Equateur céleste et dans un sens tel que le pôle nord de l'Ecliptique, c'est-à-dire l'extrémité boréale de la normale menée à ce plan par le centre de la Terre, se trouve parmi les étoiles à mi-chemin entre l'étoile polaire et Wéga de la Lyre. Et c'est cette inclinaison qui rend le Soleil plus ou moins longtemps visible au-dessus de l'horizon d'un lieu donné suivant les positions de la Terre sur son orbite, c'est-à-dire suivant les saisons, et qui explique l'inégalité des jours et des nuits ; cette inégalité du reste varie d'un lieu à l'autre : la différence est toujours nulle à l'Equateur, et aux Pôles elle va jusqu'à la suppression du jour ou de la nuit pendant une moitié de l'année.

L'ellipticité de l'orbite terrestre entraîne deux conséquences facilement observables : d'abord une variation de $\frac{3}{100}$ environ du diamètre apparent du Soleil — angle sous lequel on le voit, et qui est d'autant plus grand que l'astre est plus proche ; — ensuite l'inégalité des saisons astronomiques, c'est-à-dire des intervalles de temps qui séparent les passages du Soleil aux quatre points remarquables de sa trajectoire apparente. Le plus important de ces points est le point vernal ou point γ . Voici comment on le définit : par suite de l'inclinaison de l'Ecliptique sur l'Equateur,

les positions du Soleil lors de ses passages au méridien sont tantôt australes, tantôt boréales suivant l'époque de l'année, c'est-à-dire que le Soleil à midi est tantôt au sud tantôt au nord de l'Équateur céleste. Quand il passe d'une position australe à une position boréale, il paraît traverser l'Équateur en un point qui est justement le point vernal : c'est alors l'équinoxe de printemps, vers le 21 mars. A partir de cette date, ses positions à midi montent de plus en plus au nord jusqu'au solstice d'été — vers le 21 juin ; puis elles redescendent vers l'Équateur, qu'elles traversent à l'Équinoxe d'automne, vers le 23 septembre ; alors, redevenues australes, elles descendent au sud jusqu'au solstice d'hiver, vers le 21 décembre, après quoi elles remontent vers l'Équateur jusqu'au nouvel équinoxe de Printemps. On voit que l'écart entre les durées des saisons peut atteindre quatre jours.

Nous avons dit que la rotation de la Terre autour de son axe par rapport aux étoiles était constante. Il n'en est pas de même de sa rotation par rapport au Soleil, car, le Soleil avançant d'environ 1° par jour vers l'est parmi les étoiles, le jour solaire équivaut non plus à l'intervalle entre deux passages d'une même étoile au méridien, mais à l'intervalle entre le passage d'une étoile donnée et le second passage d'une autre étoile située 1° plus à l'est que la première. D'où une plus-value du jour solaire sur le jour sidéral, plus-value qui est d'ailleurs variable au cours de l'année ; elle n'est qu'approximativement égale au temps que la Terre mettrait à tourner d'un angle de 1° , c'est-à-dire à 4 minutes. Pour les besoins de la vie sociale on est obligé de diviser l'année en *jours solaires moyens* égaux, divisés chacun en 24 heures solaires toutes égales entre elles mais toutes un peu plus longues que les heures sidérales.

37. Mouvements propres des Planètes. Révolutions synodiques et révolutions sidérales. — Les Planètes ont un mouvement propre apparent qui résulte de leurs mouvements réels et du mouvement orbital de la Terre. Leurs mouvements réels s'accomplissent tous dans le sens direct, sur des ellipses peu aplaties dont le Soleil occupe un foyer, et dans des plans voisins de celui qui contient l'orbite terrestre : cette dernière circonstance fait que les Planètes se montrent toujours dans le Zodiaque. Les Anciens connaissaient deux planètes inférieures, c'est-à-dire plus proches du Soleil que

la Terre : Mercure et Vénus ; et trois planètes supérieures, — c'est-à-dire plus éloignées du Soleil que la Terre — : Mars, Jupiter et Saturne.

Il est commode de pouvoir caractériser d'un mot la position d'une Planète relativement à la Terre par sa relation avec la position du Soleil au moment de l'observation : on dit qu'une planète, inférieure ou supérieure, est en *conjonction* avec le Soleil par rapport à la Terre quand elle se montre dans le ciel du même côté que le Soleil. Quand il s'agit d'une planète inférieure, la conjonction est dite inférieure si la planète est en-deçà du Soleil par rapport à nous, supérieure si elle est au delà. On dit qu'une planète supérieure est en *opposition* avec le Soleil par rapport à la Terre quand elle se montre dans le ciel du côté opposé au Soleil.

La marche apparente des Planètes n'est pas toujours directe comme leur mouvement réel : elle comprend des *progressions* directes et des *rétrogradations* séparées par des *stations* ; apparences qui s'expliquent quand on fait intervenir les différences des vitesses linéaires des Planètes, y compris la Terre, suivant les dimensions de leurs orbites : ces vitesses seraient inversement proportionnelles aux racines carrées des rayons si les orbites étaient exactement circulaires : ce qui est à peu près vrai.

En effet si t et t' sont les temps de révolution de 2 planètes dont les orbites ont pour grands axes r et r' , ces 4 quantités vérifient la relation de Képler $\frac{t^2}{r^3} = \frac{t'^2}{r'^3}$. Si l'on suppose les orbites circulaires, r et r' sont les rayons, et les vitesses linéaires v et v' sont égales à $\frac{2\pi r}{t}$ et à $\frac{2\pi r'}{t'}$; d'où $t = \frac{2\pi r}{v}$ et $t' = \frac{2\pi r'}{v'}$. Transportons ces valeurs dans la relation de Képler : nous obtenons la proportion

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{r}{r'} \text{ ou } \frac{v'}{v} = \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{r'}}.$$

Ainsi une Planète est d'autant plus rapide sur son orbite qu'elle est plus proche du Soleil ⁽¹⁾. Cela étant, on comprend qu'une planète inférieure, donc plus rapide que la Terre, paraisse se déplacer

(1) Quant aux vitesses angulaires, $\omega = \frac{2\pi}{t}$ et $\omega' = \frac{2\pi}{t'}$, elles ont leurs carrés inversement proportionnels aux cubes des rayons : $\frac{\omega^2}{\omega'^2} = \frac{r'^3}{r^3}$.

dans le sens rétrograde quand elle est en conjonction inférieure, et qu'elle ait un mouvement apparent direct plus rapide que son mouvement réel quand elle est en conjonction supérieure, comme le montre la figure 6.

Une planète supérieure paraîtra de même animée d'un mouvement rétrograde quand elle sera en opposition, la Terre d'où on l'observe se déplaçant plus vite qu'elle dans le sens direct, et elle aura un mouvement apparent direct plus rapide que son mouvement réel quand elle sera en conjonction (fig. 7).

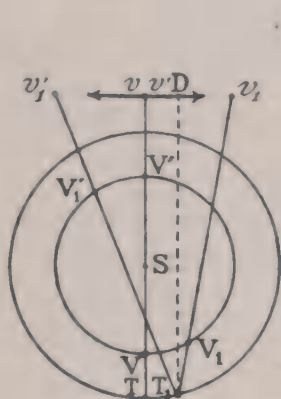


Fig. 6.

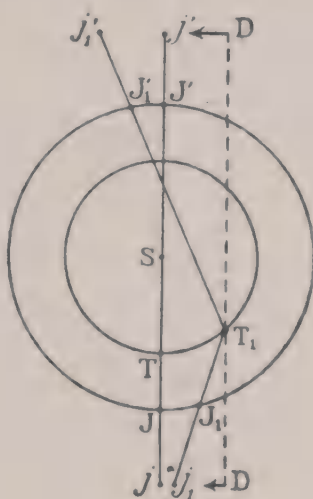


Fig. 7.

Ajoutons qu'une planète inférieure ne s'écarte jamais du Soleil au delà de certaines limites : elle est toujours dans l'angle formé par deux rayons visuels issus de la Terre et tangents à l'orbite de la planète, et cet angle comprend toujours le Soleil. L'*élongation* de la Planète est sa distance angulaire au Soleil à un moment déterminé. Son *élongation maxima* s'appelle *digression*.

Supposons qu'on puisse observer le mouvement des planètes d'un point du soleil. Pour l'observateur solaire, immobile à peu près au centre des orbites, la durée s de la révolution sidérale d'une planète quelconque, c'est-à-dire l'intervalle de 2 passages consécutifs de cette planète devant une étoile déterminée E , serait une donnée immédiate. Du point de vue de cet observateur l'orbite de la planète est fixe par rapport aux étoiles, et la *révolution sidérale* est le temps que met la planète à faire un tour sur son orbite. Le même observateur pourrait aussi connaître directement l'intervalle qui sépare par exemple 2 oppositions consé-

tives d'une planète supérieure, ou 2 conjonctions inférieures consécutives d'une planète inférieure : il trouverait que cet intervalle, σ , appelé *révolution synodique* de la planète, est différent de la révolution sidérale.

En admettant, ce qui est vrai en première approximation, que les orbites des planètes y compris la Terre sont toutes dans un même plan et toutes circulaires, avec le Soleil comme centre commun, on peut établir aisément une relation entre l'année a , la révolution synodique σ d'une planète quelconque, et sa révolution sidérale s .

Soient S, T, J les positions du Soleil, de la Terre et d'une planète supérieure, Jupiter par exemple, au moment d'une opposi-

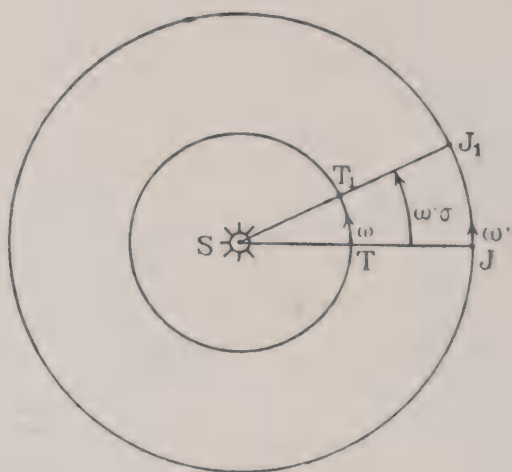


Fig. 8.

tion (fig. 8). Prenons le rayon STJ, comme origine des 2 mouvements, qui sont uniformes et de même sens, et le moment de l'opposition comme origine des temps. T a une vitesse angulaire $\omega = \frac{2\pi}{a}$ plus grande que celle de Jupiter, $\omega' = \frac{2\pi}{s}$; donc à la prochaine rencontre des rayons vecteurs ST et SJ, c'est-à-dire après une révolution synodique σ , ST aura fait un tour plus l'angle nécessaire pour rattraper SJ, qui de l'origine à la rencontre aura avancé d'un angle $\omega'\sigma$. On a donc.

$$\omega\sigma = 2\pi + \omega'\sigma, \text{ ou } \frac{2\pi}{a}\sigma = 2\pi + \frac{2\pi}{s}\sigma;$$

$$\text{d'où } \sigma\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{s}\right) = 1 \text{ et en divisant le tout par } \sigma, \quad \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{a} - \frac{1}{s}.$$

Pour une planète inférieure V, le raisonnement est le même, sauf que la vitesse angulaire ω' de la planète étant cette fois plus grande que celle de la Terre, ω , c'est le rayon SV qui fait d'abord un tour puis doit rattraper ST. On a donc (fig. 9) :

$$\omega' \sigma = 2\pi + \omega \sigma \quad \text{ou} \quad \frac{2\pi}{s} \sigma = 2\pi + \frac{2\pi}{a} \sigma ;$$

$$\text{d'où} \quad \sigma \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{a} \right) = 1, \quad \text{ou enfin} \quad \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{s} - \frac{1}{a}.$$

Passant du point de vue héliocentrique au point de vue géocentrique, demandons-nous maintenant comment les révolutions des planètes se présentent à un observateur terrestre. Pour un tel observateur les orbites planétaires ne sont plus immobiles ; or il est naturel, et c'est ce que firent quelques-uns des Anciens, d'interpréter le mouvement géocentrique d'une planète comme un mouvement de révolution de la planète sur une orbite entraînée elle-même avec le Soleil dans un mouvement de révolution annuel autour de la Terre.

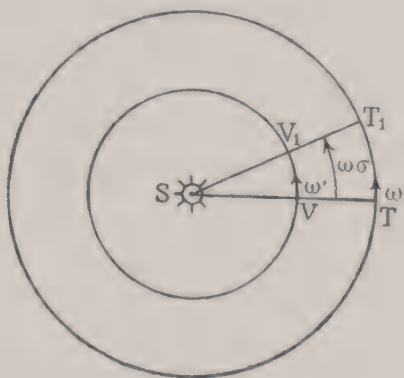


Fig. 9.

Quelle est alors la durée r de la révolution relative de la planète sur son orbite mobile ?

Notons d'abord que s ne change pas du fait qu'on se place au point de vue géocentrique, c'est-à-dire qu'on regarde le Soleil comme mobile par rapport aux étoiles ; en effet l'éloignement des étoiles est si grand que la direction SE qui sert à déterminer la révolution sidérale des planètes ne change pas sensiblement quand S passe d'un point de son orbite apparente au point diamétralement opposé.

De même σ , durée qui sépare deux alignements consécutifs et dans le même ordre, des trois astres Soleil, Terre, Planète, est indépendante du choix du système de référence, car ces alignements sont des données absolues.

Cela dit, considérons une planète inférieure, V (fig. 10) ; appelons r la durée et ρ la vitesse angulaire de sa révolution relative ; nous avons donc $\rho = \frac{2\pi}{r}$. Comme on a, pour V, $s < a$, avant que

le rayon TS ait fait un tour complet par rapport aux étoiles, SV aura repris la direction initiale SVE, c'est-à-dire que V aura accompli une révolution sidérale s . Soit α l'angle décrit alors par SV sur l'orbite mobile, donc à partir de la direction primitive

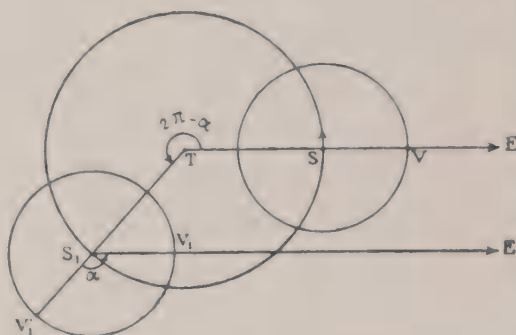


Fig. 10.

S_1V_1 ; nous avons $s\rho = \alpha$ (1). Mais pendant le même temps s , TS a décrit l'angle $2\pi - \alpha$, car les angles ETS_1 et ES_1V_1' sont égaux.

Donc nous avons

$$s\omega = 2\pi - \alpha \quad (2)$$

De (1) et de (2) nous tirons $s(\rho + \omega) = 2\pi$, d'où

$$s = \frac{2\pi}{\rho + \omega} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{r} + \frac{2\pi}{a}} = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{a}}; \text{ ou } \frac{1}{s} = \frac{1}{r} + \frac{1}{a};$$

ou enfin $\frac{1}{r} = \frac{1}{s} - \frac{1}{a}$; mais nous avons trouvé tout à l'heure $\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{s} - \frac{1}{a}$; donc $r = \sigma$: la durée de la révolution relative d'une planète inférieure sur son orbite entraînée autour de la Terre est égale à celle de sa révolution synodique σ .

Passons au cas d'une planète supérieure J (fig. 11). Appelons encore r et ρ la durée et la vitesse angulaire de sa révolution relative. Ici, on a $s > a$; donc avant que SJ ait fait un tour complet par rapport aux étoiles, TS aura repris sa position première, TSE; à ce moment là, J aura avancé sur l'orbite mobile, et TS devra rattraper la direction TJ_1 , pour qu'il y ait une « révolution » synodique. Appelons φ l'angle J_1TJ . Si nous menons une parallèle $S_1J'_1$ à SJ, nous retrouvons en $J'_1S_1J_1$ l'angle φ , qui mesure le mou-

vement de J sur son orbite mobile dans le temps σ . Nous avons donc

$$\sigma\varphi = \varphi, \quad \text{et} \quad \sigma\omega = 2\pi + \varphi; \quad \text{d'où} \quad \sigma(\omega - \varphi) = 2\pi;$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\omega - \varphi} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{a} - \frac{2\pi}{r}} = \frac{1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{r}}$$

ou enfin $\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{a} - \frac{1}{r}$; mais nous avons trouvé tout à l'heure $\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{a} - \frac{1}{s}$; donc $r = s$: la durée de la révolution d'une planète

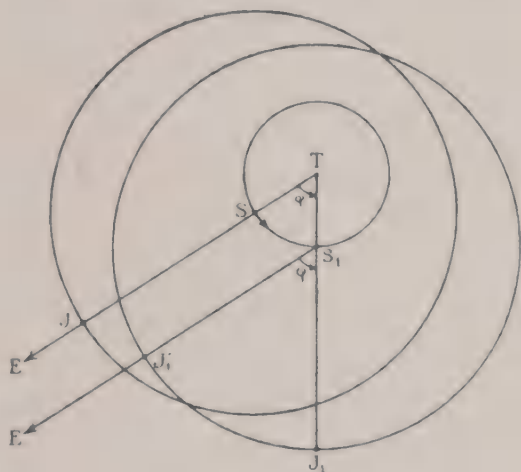


Fig. 11.

supérieure sur son orbite entraînée autour de la Terre est égale à celle de sa révolution sidérale s . Nous verrons que ces relations entre les durées des révolutions sur les orbites supposées mobiles et celles des révolutions synodiques ou sidérales sont d'une grande importance pour comprendre comment on a pu passer, historiquement, du géocentrisme à l'héliocentrisme.

38. Mouvement propre de la Lune. — Du point de vue d'un observateur solaire, la Lune suit la Terre dans son mouvement annuel. On peut interpréter ce mouvement héliocentrique de la Lune comme une révolution de cet astre sur une orbite animée d'un mouvement de révolution autour du Soleil. Sur cette orbite mobile la Lune a fait un tour complet après une révolution synodique, c'est-à-dire quand le rayon vecteur TL se retrouve avec la même orientation sur la droite mobile STL, L étant un point fixe sur l'orbite. Mais comme la droite ST tourne, par rapport aux

étoiles, dans le même sens que le rayon vecteur TL, celui-ci qui a une vitesse angulaire plus grande, a fait un tour relativement aux étoiles avant d'avoir rattrapé l'alignement STL. Donc du point de vue héliocentrique la révolution de la Lune sur son orbite mobile est sa révolution synodique, et sa révolution sidérale est plus courte que cette révolution synodique (fig. 12).

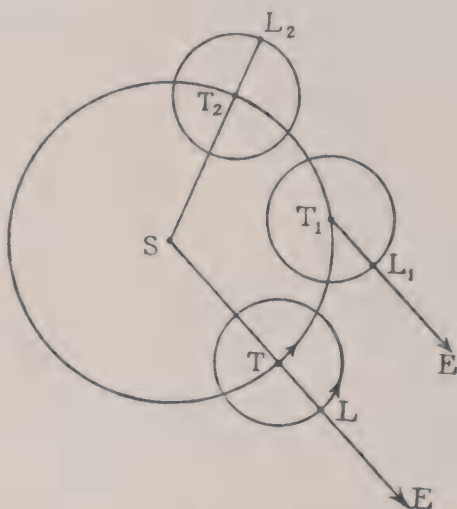


Fig. 12.

Du point de vue géocentrique l'orbite lunaire est fixe par rapport aux étoiles, et la révolution de la Lune sur son orbite immobilisée est sa révolution sidérale; pour qu'une révolution synodique soit accomplie, le rayon vecteur TL doit maintenant avoir dépassé sa position initiale par rapport aux étoiles et rattrapé le rayon mobile TS. Il faut donc dire ici que la révolution synodique de la Lune est plus longue que sa révolution sidérale, ou que sa révolution sur son orbite (fig. 12').

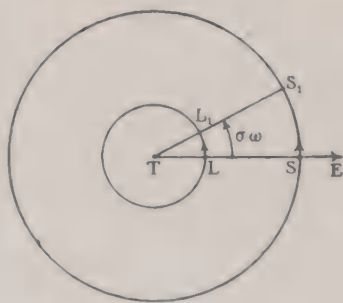


Fig. 12'.

reste la relation entre les durées σ et s des 2 révolutions, et l'année a , est la même que pour une planète inférieure :

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{s} - \frac{1}{a}.$$

Mais cette relation approchée supposerait encore que l'orbite apparente du Soleil et l'orbite de la Lune soient dans un même plan

et toutes deux circulaires et centrées sur la Terre. En fait l'orbite de la Lune est une ellipse dont la Terre occupe un foyer, et le plan de cette orbite fait avec l'Ecliptique un angle de 5° environ.

Le sens de translation de la Lune est le sens direct : si nous observons ses passages au méridien plusieurs jours de suite, la Lune, comme le Soleil, se montre de plus en plus à l'est parmi les étoiles ; mais son avance est bien plus rapide que celle du Soleil : 13° par jour environ, au lieu de 1° . Sa révolution sidérale dure à peu près 27 j. $1/3$, et sa révolution synodique 29 j. $1/2$. Comme les phases dépendent des positions de la Lune relativement à la Terre et au Soleil, la période de leur retour, la *lunaison*, est égale à la révolution synodique.

Le mouvement de la Lune est compliqué de plusieurs anomalies que nous n'avons pas intérêt à connaître. Ajoutons seulement que le diamètre apparent de notre satellite varie du fait de l'ellipticité de son orbite, et aussi parce que la rotation de la Terre rapproche ou éloigne de la Lune un même observateur d'une façon sensible au cours d'un même jour.

39. Inégalités secondaires des mouvements célestes. — La précession. — Les mouvements des astres qui sont en première approximation ce que nous venons de dire, présentent à qui les étudie d'une façon plus attentive de petites variations, ou *inégalités*, nombreuses et compliquées à définir. Nous ne signalerons que l'une des plus importantes, le mouvement lent de l'axe terrestre.

La ligne des pôles, avons-nous dit, n'est pas toujours dirigée vers la même étoile. C'est autour de la normale menée à l'Ecliptique par le centre de la Terre qu'elle décrit un cône, dans le sens rétrograde, en une période très longue, d'environ 26.000 ans, son déplacement angulaire en une année étant d'à peu près $50''$ d'arc. Une conséquence de ce mouvement est le déplacement lent de l'Equateur céleste, lié à la ligne des pôles. Il en résulte la *précession des équinoxes*, c'est-à-dire le fait que d'une année à l'autre, le point vernal, où la trajectoire apparente du Soleil coupe d'Equateur, va au devant du Soleil, qui, lui, semble aller dans le sens direct. L'équinoxe de printemps se trouve donc chaque année un peu en avance sur la date où il aurait lieu si l'Equateur était fixe. On appelle année *tropique* l'intervalle qui sépare deux passages

successifs du Soleil au point vernal : cette année est un peu plus courte que l'année sidérale, de 20 minutes environ, temps mis par le Soleil pour parcourir un arc de $50''$.

Comme les saisons dépendent de l'année tropique, il a fallu établir le calendrier d'après cette année, qui dure 365 jours 5 h. 48'45''. C'est la connaissance plus exacte de cette durée qui rendit possible à certaines époques de l'histoire une amélioration du calendrier.

Le mouvement lent de l'axe terrestre enlève au système de référence constitué par l'axe du monde et l'Equateur céleste la fixité souhaitable. Aussi utilise-t-on un autre système, constitué par le plan de l'Ecliptique et par la ligne des pôles correspondant à ce plan. Ce système est non pas absolument, mais à très peu de chose près, *invariable* par rapport à l'ensemble des étoiles.

Au lieu de dire, donc, que l'Ecliptique est incliné par rapport à l'Equateur, nous dirons que l'Equateur est incliné sur l'Ecliptique. Son inclinaison est toujours d'environ $23^{\circ} 1/2$ car la ligne des pôles est toujours une génératrice du cône qu'elle décrit, et que l'axe de ce cône est toujours perpendiculaire à l'Ecliptique. Mais les pôles célestes tournent en 26.000 ans autour des « pôles de l'Ecliptique ». Ainsi le pôle boréal tourne autour du pôle Nord de l'Ecliptique dans le sens rétrograde ; actuellement il est près de l'étoile polaire, dans 13.000 ans il sera à l'opposé, près de Wéga. Le pôle Nord de l'Ecliptique, lui, est à mi-chemin entre ces 2 étoiles, dans la constellation du Dragon.



TABLE DES MATIÈRES

Le Problème des mouvements réels

	Pages
AVANT-PROPOS	I-1
ART. 1 ^{er} . — Notions élémentaires sur le mouvement et ses causes, n ^{os} 1-13.....	I-5
ART. 2. — Les sensations de mouvement et leur interprétation cou- rante, n ^{os} 14-22	I-25
ART. 3. — Le problème scientifique du discernement des mouve- ments réels, n ^{os} 23-27	I-41
ART. 4. — Recours nécessaire à l'Astronomie, n ^{os} 28-31	I-50
ART. 5. — Les apparences célestes fondamentales, n ^{os} 32-39.....	I-55

Saint-Amand (Cher), France. — Imprimerie R. BUSSIÈRE. — 19-3-1937.

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.

F. ENRIQUES

De l'Académie *Dei Lincei*
Professeur à l'Université de Rome

**PHILOSOPHIE ET HISTOIRE
DE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE**

Ch. FABRY

Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences

OPTIQUE

E. FAURÉ-FREMIET

Professeur au Collège de France

BIOLOGIE

(Embryologie et Histogenèse)

Ch. FRAIPONT

Professeur à la Faculté des Sciences
de Liège

**PALÉONTOLOGIE
ET LES GRANDS PROBLÈMES
DE LA BIOLOGIE GÉNÉRALE**

Maurice FRECHET

Professeur à la Sorbonne

ANALYSE GÉNÉRALE

M. L. GAY

Professeur de Chimie-Physique
à la Faculté des Sciences de Montpellier

THERMODYNAMIQUE ET CHIMIE

J. HADAMARD

Membre de l'Institut

**ANALYSE MATHÉMATIQUE
ET SES APPLICATIONS**

Victor HENRI

Professeur à l'Université de Liège

PHYSIQUE MOLÉCULAIRE

A. F. JOFFÉ

Directeur de l'Institut Physico-Technique
de Leningrad

PHYSIQUE DES CORPS SOLIDES

A. JOUNIAUX

Professeur à l'Institut de Chimie de Lille

CHIMIE ANALYTIQUE
(Chimie-Physique, minérale
et industrielle)

N. K. KOLTZOFF

Directeur de l'Institut de Biologie
expérimentale de Moscou
Membre honoraire R. S. Edinbourg

**LA GÉNÉTIQUE ET LES PROBLÈMES
DE L'ÉVOLUTION**

P. LANGEVIN

Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France

I. — RELATIVITÉ

II. — PHYSIQUE GÉNÉRALE

Louis LAPICQUE

Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne

**PHYSIOLOGIE GÉNÉRALE
DU SYSTÈME NERVEUX**

A. MAGNAN

Professeur au Collège de France

MORPHOLOGIE

DYNAMIQUE

ET MÉCANIQUE DU MOUVEMENT

Ch. MARIE

Directeur de Laboratoire
à l'Ecole des Hautes Etudes

ÉLECTROCHIMIE APPLIQUÉE

Ch. MAURAIN

Membre de l'Institut
Doyen de la Faculté des Sciences
Directeur de l'Institut de Physique du Globe

PHYSIQUE DU GLOBE

André MAYER

Professeur au Collège de France

PHYSIOLOGIE

Henri MINEUR

Astronome à l'Observatoire de Paris
Maître de Recherches

ASTRONOMIE STELLAIRE

Ch. MUSCELEANU

Professeur à la Faculté des Sciences
de Bucarest

PHYSIQUE GÉNÉRALE ET QUANTA

M. NICLOUX

Professeur à la Faculté de Médecine
de Strasbourg

CHIMIE ANALYTIQUE
(Chimie organique et biologique)

P. PASCAL

Correspondant de l'Institut
Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole
Centrale des Arts et Manufactures

**CHIMIE
GÉNÉRALE et MINÉRALE**

Ch. PÉREZ

Professeur à la Sorbonne
BIOLOGIE ZOOLOGIQUE

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE



ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



J. PERRIN
Membre de l'Institut
Prix Nobel de Physique
Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris

ATOMISTIQUE

Marcel PRENANT
Professeur à la Sorbonne

- I. — BIOLOGIE ÉCOLOGIQUE
- II. — LEÇONS DE ZOOLOGIE

A. REY
Professeur à la Sorbonne
HISTOIRE DES SCIENCES

Y. ROCARD
Maître de Recherches
THÉORIES MÉCANIQUES
(Hydrodynamique-Acoustique)

R. SOUÈGES
Chef de Travaux
à la Faculté de Pharmacie
EMBRYOLOGIE
ET MORPHOLOGIE VÉGÉTALES

TAKAGI
Professeur à l'Université Impériale de Tokyo
MATHÉMATIQUES GÉNÉRALES

TAMIYA-(HIROSHI)
Membre du Tokugawa Biologischen
Institut-Tokyo
BIOLOGIE (Physiologie cellulaire)

A. TCHITCHIBABINE
Membre de l'Académie des Sciences
de l'U. R. S. S.

CHIMIE ORGANIQUE

(Série hétérocyclique)

Georges TEISSIER
Sous-directeur de la Station
Biologique de Roscoff

BIOMÉTRIE

ET STATISTIQUE BIOLOGIQUE

G. URBAIN
Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris
THÉORIES CHIMIQUES

Pierre URBAIN
Maître de Conférences à l'Institut
d'Hydrologie et de Climatologie de Paris

GÉOCHIMIE

Y. VERLAINE
Professeur à l'Université de Liège
PSYCHOLOGIE ANIMALE

P. WEISS
Membre de l'Institut
Directeur de l'Institut de Physique
de l'Université de Strasbourg

MAGNÉTISME

R. WURMSER
Directeur du Laboratoire de Biophysique
de l'Ecole des Hautes Etudes
BIOPHYSIQUE

Actualités Scientifiques et Industrielles

Série 1937 (suite) :

- | | |
|---|--------|
| 466. LÉON BINET et GEORGES WELLER. Le glutathion..... | 20 fr. |
| 467. GEORGES MATISSE. La question de la finalité en Physique et en Biologie. I. — Principes généraux. Lois : d'économie, d'extremum, de simplicité..... | 10 fr. |
| 468. GEORGES MATISSE. La question de la finalité en Physique et en Biologie. II. — Faits particuliers. Dispositifs et phénomènes présentés par les Êtres vivants. Examen critique des théories..... | 18 fr. |
| 469. H. I. MARESQUELLE. Signification générale de la différence sexuelle..... | 18 fr. |
| 470. M. COLLIN. L'innervation de la glande pituitaire (Anatomie et Physiologie)..... | 20 fr. |
| 471. M. ARCAÏ. Les ultrasons et leurs applications..... | 15 fr. |
| 472. GEORGES BOURION. L'ultraconvergence des séries de Taylor..... | 12 fr. |
| 473. M. LACROUTE. Rales d'absorption dans les spectres stellaires..... | 20 fr. |
| 474. GASTON RICHARD. La conscience morale et l'expérience morale..... | 15 fr. |
| 475. GASTON RICHARD. La Loi morale, les Lois naturelles et les Lois sociales..... | 15 fr. |
| 476. L. ESCANDE. Barrages. I. — Calcul des barrages poids à profil triangulaire. Théorie et calculs..... | 20 fr. |
| 477. L. ESCANDE. Barrages. II. — Calcul des barrages poids à profil triangulaire. Pratique du calcul. Abaques relatifs au cas ou N=0,03..... | 20 fr. |
| 478. L. ESCANDE. Barrages. III. — Profil optimum de barrage déversoir. Trace aerodynamique des piles..... | 20 fr. |



LISTE COMPLÈTE A LA FIN DU VOLUME

